

## 平朔煤和生物质共热解实验研究

王健<sup>1</sup>, 张守玉<sup>1</sup>, 郭熙<sup>1</sup>, 董爱霞<sup>1</sup>, 陈川<sup>1</sup>, 熊绍武<sup>1</sup>, 房倚天<sup>2</sup>

(1.上海理工大学能源与动力工程学院热能工程研究所, 上海200093; 2.中国科学院山西煤炭化学研究所, 山西太原030001)

**摘要:** 利用热重分析技术对平朔煤、生物质及两者混合物的热解特性进行了研究, 考察了生物质掺混比例对平朔煤热解的影响。结果表明, 不同掺混比例下生物质与平朔煤共热解时, 平朔煤的挥发分析出温度和最大热解速率对应的温度呈现出规律性变化。将混合样品热解时的实际失重速率曲线与按比例折算后的曲线进行对比, 发现实际失重速率曲线与折算曲线有所偏差, 并不是平朔煤与生物质热解失重速率的简单加和, 说明混合热解过程中有协同作用。同时, 利用Coats - Redfern法, 对平朔煤、生物质及两者混合物的热解主要阶段用一级反应过程描述, 计算其动力学参数, 发现反应活化能E和指前因子A随着生物质掺混比例不同呈现出规律性变化, 对其规律进行了机理分析, 证明了掺混生物质对平朔煤热解起到了促进作用, 认为平朔煤与生物质共热解过程存在协同效应。

生物

质能属于

可再生能源, 是仅

次于煤、石油和天然气之后的第四大

能源, 具有来源广、污染低、可再生和CO<sub>2</sub>

零排放等优

点。中国生物质资源十

分丰富, 仅农作物秸秆的年产量便有7亿t以上,

折合标准煤约为3.5亿t<sup>[1]</sup>

。但是, 生物质分布分散、能量密度低、收集运输和预处理费用高、热值低、水分大、转化利用需要外热源。平朔煤内在水分低、灰分较高、硫含量和氯含量高、发热量居中、灰熔点高于1500、具有中高挥发分、属于较为年轻的烟煤, 所以热解相对易于进行。平朔煤与生物质混合热解可以有效地解决他们单独利用时的问题, 同时充分利用了生物质中丰富的碱金属和氢, 有可能存在协同效应。

目前, 世界各国学者对生物质与煤共热

解过程进行了相关研究。Jones等<sup>[2]</sup>

用热重分析仪和气相色谱-质谱联用分析仪, 对低阶煤和松木屑在慢速升温条件下进行了混合热解。结果表明, 低阶煤和松木屑热解温度区域有部分重叠, 而且混合物料热解时挥发分产率有所增加, 所以混合物料之间存在协同效应。

Wei等<sup>[3]</sup>

对大雁煤、铁法煤、豆秸秆和木质废弃物在自由下落床中进行了共热解实验, 发现混合物热解半焦的反应活性增强, 认为煤与生物质共热解存在协同效应。阎维平等<sup>[4]</sup>

用生物质混合物和煤共热解, 发现生物质对煤的热解同时具有一定的促进和抑制作用, 生物质混合物与煤共热解存在协同效应。Collot等<sup>[5]</sup>

固定床和流化床两种反应器上对欧洲白桦树和DawMill煤进行了共热解研究, 固定床实验中发现, 焦油产率比其各自单独热解时高4%, 而在流化床实验中, 挥发分产率比理论值高5%左右。在用森林残余物和波兰煤共热解时发现, 除了掺混比例为1:1时, 半焦产率与计算值有所差异外, 其他掺混比例下, 实验值与计算值相一致。

Collot等<sup>[5]</sup>

认为, 这些差异太小不能说明它们之间存在协同效应。

Pan等<sup>[6]</sup>

在常压下, 用热重分析仪对松木屑和多种劣质煤进行了共热解实验研究, 热解温度在383~1173K, 升温速率为100K/min。结果表明, 混合物料之间不存在协同效应。李文等<sup>[7]</sup>

用锯末、稻壳与大同煤按不同比例混合热解, 得到共热解转化率为煤与生物质各自转化率之和的结论; 当锯末和兖州煤共热解时, 两者热解峰之间有重叠区, 认为锯末与兖州煤共热解略有协同作用。李世光等<sup>[8]</sup>利用慢速加热的方法对煤与生物质共热解实验研究, 当煤开始热解时, 生物质已基本完全热解, 两者之间难以产生协同反应。

本实验采用热重分析方法, 对木屑、稻秸秆以及平朔煤在不同掺混比例下进行了热解实验, 考察不同掺混比例的木屑和稻秸秆对平朔煤热解特性的影响, 并采用一级反应模型求解热解反应的动力学参数, 以考察平朔煤与生物质共热

解过程中是否存在协同效应。

## 1 实验部分

### 1.1 实验原料

实验选用山西平朔煤、上海地区常见的木屑和崇明地区的稻秸秆。先用磨机将平朔煤和生物质分别研磨，磨碎至一定粒径，然后再将磨细的煤和生物质进行不同比例掺混，并磨碎至粒径小于150目(0.106mm)，储存于105 干燥箱内备用。原料的工业分析和元素分析见表1。

表 1 原料的工业分析和元素分析  
Table 1 Proximate and ultimate analysis of the pure samples

Sample	Proximate analyses $w_{ad}/\%$				Ultimate analyses $w_{ad}/\%$					$Q$ /(MJ·kg <sup>-1</sup> )
	M	A	V	FC	C	H	O	N	S <sub>t</sub>	
Pingshuo coal	2.16	31.26	29.21	37.37	52.05	3.07	8.31	0.79	2.36	19.83
Sawdust	3.13	1.64	79.67	15.56	46.92	5.63	41.78	0.86	0.04	17.79
Rice straw	3.63	11.83	64.82	19.72	45.26	4.15	34.71	0.30	0.12	14.94

### 1.2 实验设备

实验所用的仪器为北京恒久科学仪器厂的HCT - 2型差热分析仪，该仪器可以对微量试样同时进行差热分析、热重分析及热重微分测量，可在线同步精确测定样品在反应过程中的质量变化，天平灵敏度为0.1 μg。

### 1.3 实验步骤

每次实验时，取不同掺混比例的混合样品10mg均匀地放入Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>坩埚中，并置于热重分析仪的加热炉内，然后在高纯氮气(99.999%)气氛下以10K/min的升温速率升温至1273K，流量为70mL/min，实验结束后在高纯氮气气氛下冷却至室温。

## 2 结果与讨论

### 2.1 生物质与平朔煤单独热解实验

图1为三种原料单独热解时的DTG曲线。由图1可知，木屑热解的挥发分初析温度和终止温度为528~753K，稻秸秆为508~743K，平朔煤为658~933K。木屑和稻秸秆的最大热解速率(dx/dt)<sub>max</sub>明显比平朔煤大，且最大热解速率对应的温度T<sub>max</sub>比平朔煤低。三者的热解特征参数见表2。其中，T<sub>1</sub>为挥发分初析温度，是DTG曲线上对应热解速率dx/dt=0.1mg/min的温度<sup>[9]</sup>

；T<sub>2</sub>是挥发分析出终止温度，是DTG曲线上过峰值点作垂线与TG曲线相交于一点，过该点作TG曲线的切线与TG结束曲线的平行线交于一点所对应的温度<sup>[4, 9]</sup>

；(dx/dt)<sub>max</sub>和T<sub>max</sub>是最大热解速率及其对应的温度，即DTG曲线上最大值和最大值处的温度。

### 2.2 不同掺混比例生物质与平朔煤共热解特性

图2和图3分别为生物质与平朔煤按不同比例掺混后热解的DTG曲线。由图2和图3可知，混合样品的热解转化率曲线有三段明显失重区域，分别对应于DTG曲线上的三个峰：第一个峰为混合样品水分析出阶段，第二个峰为混合样品中生物质热解阶段，第三个峰为混合样品中平朔煤热解阶段。随着生物质掺混比例增加，生物质热解速率逐渐增大，平朔煤热解速率则相应减小。

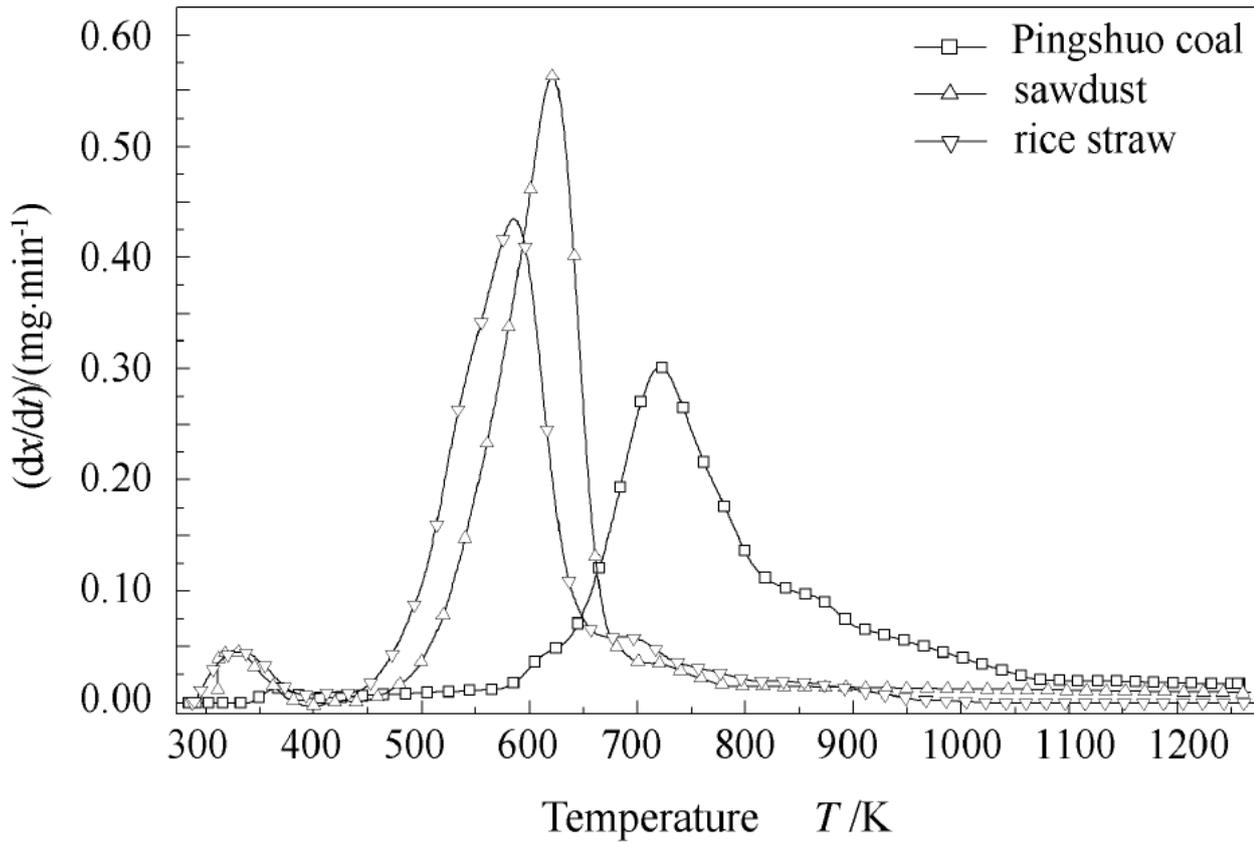


图 1 平朔煤、木屑和稻秸秆热解的 DTG 曲线

Figure 1 DTG curves of the pure samples

表 2 平朔煤、木屑和稻秸秆单独热解特征参数

Table 2 Pyrolysis characteristic parameters of individual samples

Sample	$T_1/K$	$(dx/dt)_{max}/(mg \cdot min^{-1})$	$T_{max}/K$	$T_2/K$
Pingshuo coal	657.5	0.301 2	722.3	789.2
Sawdust	527.2	0.563 5	620.9	660.1
Rice straw	508.3	0.434 4	594.9	643.3

根据相关文献[4],可以假定混合热解时,煤的挥发分初析温度近似等于生物质挥发分析出终止温度。本实验中当生物质与平朔煤共热解时,平朔煤的挥发分初析温度取生物质的挥发分析出终止温度。

表3为不同掺混比例的生物质与平朔煤的热解特征参数。其中,  $T_1$ 为混合样品中生物质的挥发分初析温度;  $T_2$ 为混合样品中平朔煤的挥发分初析温度;  $T_{max1}$ 和 $T_{max2}$ 分别为第1段和第2段最大热解速率对应的温度。

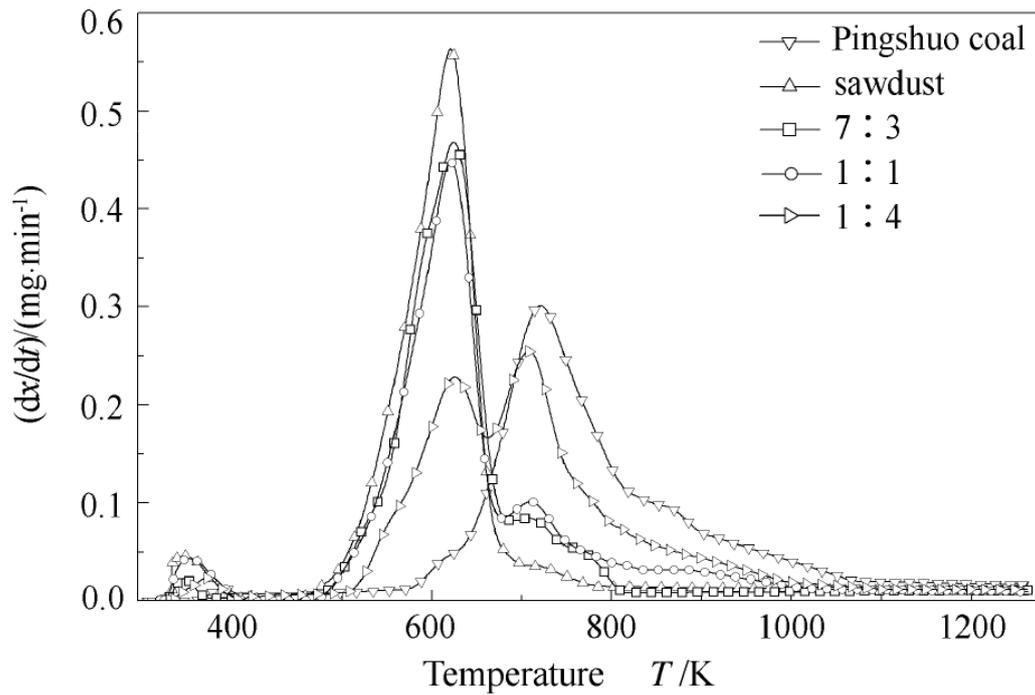


图 2 木屑与平朔煤混合热解的 DTG 曲线  
Figure 2 DTG curves of pyrolytic behaviors  
of sawdust/Pingshuo coal blends

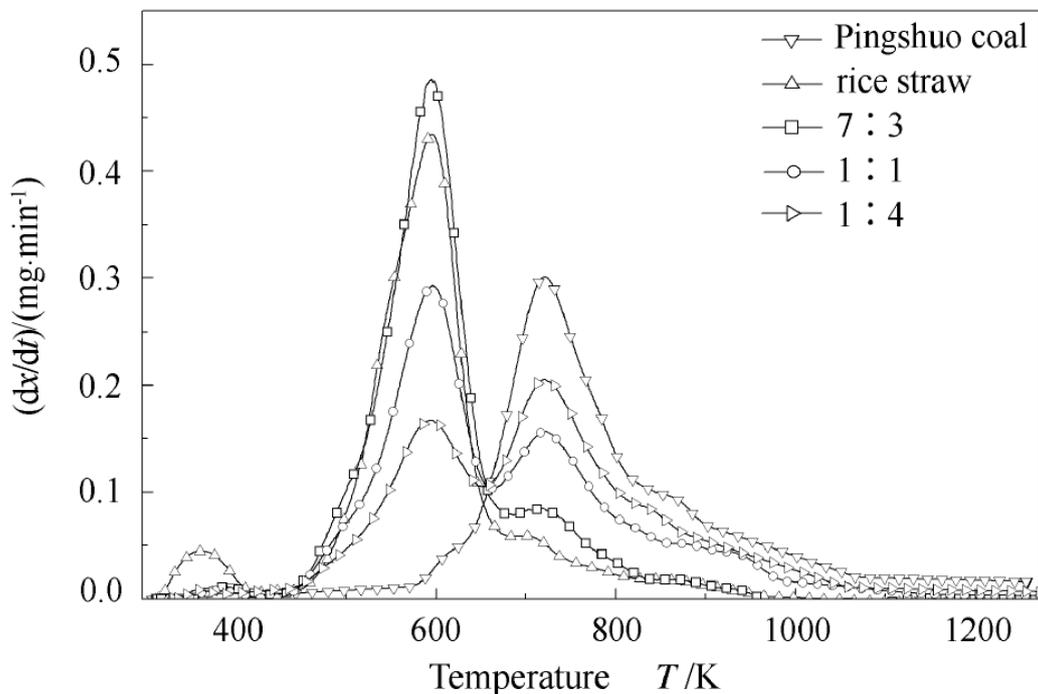


图 3 稻秸秆与平朔煤混合热解的 DTG 曲线  
Figure 3 DTG curves of pyrolytic behaviors  
of rice straw/Pingshuo coal blends

**表 3 不同掺混比例的生物质与平朔煤的热解特征参数**  
Table 3 Pyrolysis characteristics of biomass/Pingshuo coal blends

Sample	$T_1/K$	$T_{max1}/K$	$T_{max2}/K$	$T_2/K$
80% Pingshuo coal+20% sawdust	565.9	626.6	710.5	652.3
50% Pingshuo coal+50% sawdust	537.9	620.3	708.8	649.6
30% Pingshuo coal+70% sawdust	539.8	624.2	713.6	661.2
80% Pingshuo coal+20% rice straw	546.8	593.4	721.5	647.8
50% Pingshuo coal+50% rice straw	522.9	595.8	719.2	642.8
30% Pingshuo coal+70% rice straw	449.6	597.2	723.1	658.4

由表3可知，生物质与平朔煤共热解时，平朔煤的挥发分析出温度 $T_2$ 以及最大热解速率对应的温度 $T_{max2}$ 随生物质的掺混比例不同而发生变化，混合热解中生物质热解峰向高温段移动，而平朔煤热解峰向低温段移动。生物质掺混比例在50%以下时，随着生物质掺混比例的增大，平朔煤最大热解速率对应的温度要低于其单独热解时的温度，并逐渐降低；但当生物质掺混比例增大到50%以上时，其对应的温度相应升高甚至高于平朔煤单独热解时的温度。生物质与平朔煤共热解时，平朔煤的挥发分析出温度同样呈类似规律，即生物质掺混比例小于50%时，平朔煤的挥发分析出温度 $T_2$ 比平朔煤单独热解时的要低，但当生物质掺混比例超过50%时， $T_2$ 会升高并高于平朔煤单独热解时的温度。结果表明，生物质的掺入有利于平朔煤的热解向低温段移动，挥发分析出温度以及最大热解速率对应的温度相应提前，生物质的存在对平朔煤热解具有一定的促进作用；但随着生物质掺混比例的上升，这种促进作用逐渐下降，反而会对平朔煤热解起抑制作用。

一方面，生物质中碱金属含量较高，特别是 $K_2O$ 和 $Na_2O$ 含量比平朔煤中含量高很多，生物质中的高碱金属含量会对平朔煤热解起到一定的催化作用。其次，生物质中H/C较高，其中，木屑H/C为0.12，稻秸秆H/C为0.092，而平朔煤H/C仅为0.059。当生物质与平朔煤混合热解时，生物质先于平朔煤热解，产生足量的氢，而氢气气氛对平朔煤的热解影响较大，在共热解过程中，生物质中的氢有可能转移到平朔煤中，从而促进平朔煤的热解。另一方面，生物质在热解过程中会出现不同程度的软化、变形甚至流动，随着生物质掺混比例的增加，大量生物质可能在平朔煤挥发分析出之前黏附、覆盖在平朔煤颗粒表面，如果生物质掺混比例过大，生物质提前热解会产生较多的碳黑，也会附着在平朔煤颗粒表面，堵塞平朔煤孔隙，不利于平朔煤挥发分的逸出和扩散<sup>[10]</sup>，因而两者共热解过程中平朔煤的挥发分析出温度以及最大热解速率对应的温度相应升高至其单独热解时的温度。总的来说，平朔煤与生物质共热解之间存在协同效应。

从热解失重量和失重速率角度出发，进一步了解生物质对平朔煤热解的影响。取木屑、稻秸秆和平朔煤单独热解时，热解开始段、中间段和结束段不同温度点的失重量进行折算，折算式<sup>[11]</sup>如下：

$$m = m_{ps} \times (1 - w) + m_b \times w \quad (1)$$

式中， $m$  为各温度点的热解失重量，mg； $w$  为生物质在混合样品中的质量分数； $b$  代表生物质； $ps$  代表平朔煤。

然后分别对热解失重量的实验曲线和按比例折算后的曲线做微分，求得其失重速率曲线。图4、图5分别为木屑、稻秸秆与平朔煤按不同掺混比例混合热解的实际失重速率曲线与按比例折算曲线的对比图。

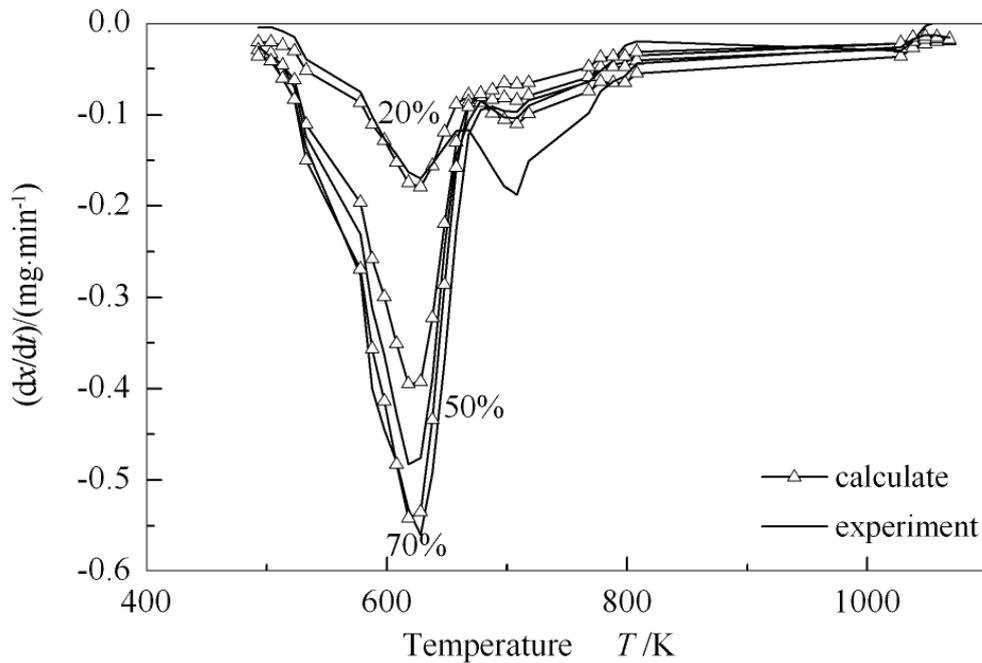


图4 木屑与平朔煤混合热解的DTG曲线实验值与计算值的对比

Figure 4 Comparison between experimental and calculated DTG curves of co-pyrolysis of sawdust/Pingshuo coal blends

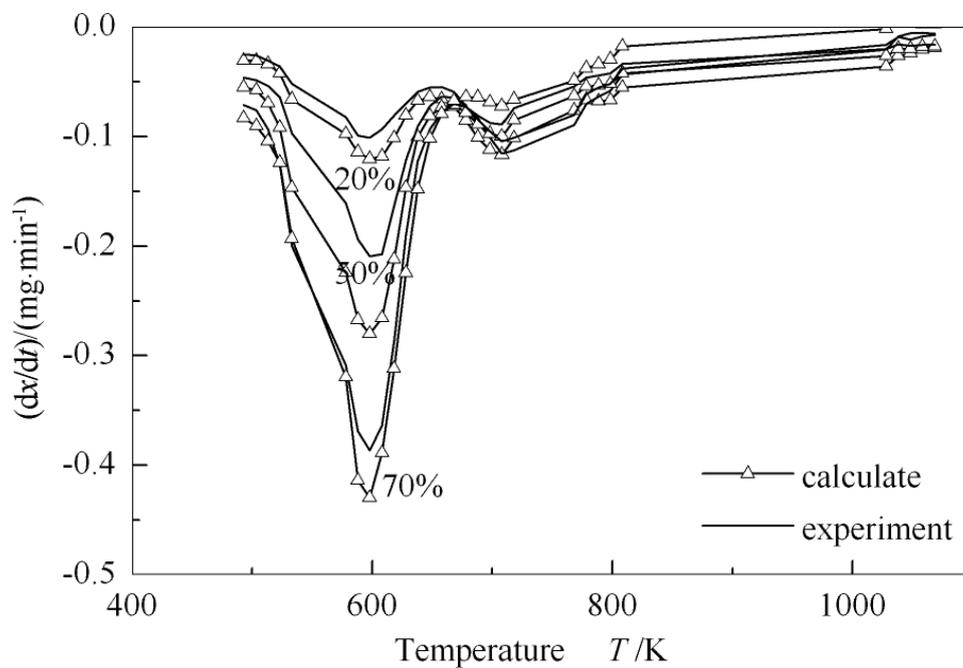


图5 稻秸秆与平朔煤混合热解的DTG曲线实验值与计算值的对比

Figure 5 Comparison between experimental and calculated DTG curves of co-pyrolysis of rice straw/Pingshuo coal blends

由图4、图5可知，混合样品热解的实际失重速率曲线与按比例折算后的曲线有所偏差，木屑与平朔煤混合热解的实际失重速率曲线，在低温段和高温段的热解失重速率都要大于相应计算值，说明木屑与平朔煤共热解时起了相互促进作用，木屑中碱金属含量和氢含量相对较高，能够对平朔煤热解起催化和促进作用，产生协同效应。而从稻秸秆与平朔煤混合热解的实际失重速率曲线可以看出，低温段的热解失重速率小于相应计算值，可能是稻秸秆热解时，平朔煤还没开始热解，平朔煤对稻秸秆热解促进作用不明显，而且低温下未反应的平朔煤会阻碍稻秸秆挥发分的析出；高温段热重失重速率大于计算值，这可能是因为稻秸秆中含量较高的碱金属和氢对平朔煤热解起到催化促进作用。

### 2.3热解反应动力学分析

根据化学反应中的质量守恒定律、Arrhenius[12]方程以及微商法，确定热解过程的反应速率表达式为：

$$\frac{dx}{dT} = kf(x) = \frac{A}{\beta} \exp(-E/RT) (1-x)^n \quad (2)$$

式中,反应转化率  $x = \frac{w_0 - w_t}{w_0 - w_\infty}$ ,  $w_0$  为样品初始质量,mg;  $w_t$  为反应某时刻样品质量,mg;  $w_\infty$  为反应结束后最终固体质量,mg;  $k$  为反应速率常数;  $\beta$  为升温速率,  $\beta = \frac{dT}{dt}$ ;  $T$  为热力学温度,K;  $A$  为指前因子;  $E$  为表观活化能, kJ/mol;  $R$  为气体常数, 8.314 J/(mol·K);  $n$  为反应级数。

对上式用 Coats-Redfern 法<sup>[13]</sup> 进行处理,分离变量积分并取近似值可得到:

$$\ln \left[ \frac{-\ln(1-x)}{T^2} \right] = \ln \left[ \frac{AR}{\beta E} \left( 1 - \frac{2RT}{E} \right) \right] - \frac{E}{RT}, n=1 \quad (3)$$

$$\ln \left[ \frac{1-(1-x)^{1-n}}{(1-n)T^2} \right] = \ln \left[ \frac{AR}{\beta E} \left( 1 - \frac{2RT}{E} \right) \right] - \frac{E}{RT}, n \neq 1 \quad (4)$$

对一般的反应区和大部分的  $E$  而言,  $2RT/E$  小于 1, 所以  $\ln \left[ \frac{AR}{\beta E} \left( 1 - \frac{2RT}{E} \right) \right]$  可以看作常数, 上式简化为:

$$\ln \left[ \frac{-\ln(1-x)}{T^2} \right] = \ln \left[ \frac{AR}{\beta E} \right] - \frac{E}{RT}, n=1 \quad (5)$$

$$\ln \left[ \frac{1-(1-x)^{1-n}}{(1-n)T^2} \right] = \ln \left[ \frac{AR}{\beta E} \right] - \frac{E}{RT}, n \neq 1 \quad (6)$$

很多学者对生物质和煤的热解动力学提出了各种分析模型, 其中, 一级反应模型被广泛接受<sup>[11,14]</sup>。本实验采用平朔煤与生物质的热解级数  $n=1$ , 用  $\ln \left[ \frac{-\ln(1-x)}{T^2} \right] \sim \frac{1}{T}$  可作一直线, 其斜率为  $-\frac{E}{R}$ , 截距为  $\ln \left[ \frac{AR}{\beta E} \right]$ , 由此可求得活化能  $E$  和指前因子  $A$ , 计算结果见表 4。

表 4 不同掺混比例的生物质与平朔煤的热解动力学参数  
Table 4 Pyrolysis kinetic parameters of biomass/Pingshuo coal blends

Sample	Reaction 1				Reaction 2			
	range of temperature T/K	activation energy E/(kJ·mol <sup>-1</sup> )	frequency factor A/min <sup>-1</sup>	related coefficient R <sup>2</sup>	range of temperature T/K	activation energy E/(kJ·mol <sup>-1</sup> )	frequency factor A/min <sup>-1</sup>	related coefficient R <sup>2</sup>
Pingshuo coal	-	-	-	-	629 ~ 758	44.94	66.55	0.997 0
Sawdust	501 ~ 658	57.13	9 211.42	0.994 7	-	-	-	-
Rice straw	476 ~ 627	53.86	6 102.52	0.998 2	-	-	-	-
80% Pingshuo coal+20% sawdust	506 ~ 663	54.64	1 522.78	0.996 9	665 ~ 770	30.78	9.73	0.991 6
50% Pingshuo coal+50% sawdust	506 ~ 679	55.40	4 054.57	0.995 5	667 ~ 743	7.81	0.09	0.996 8
30% Pingshuo coal+70% sawdust	480 ~ 685	56.29	5 015.59	0.993 7	686 ~ 772	4.02	0.03	0.972 9
80% Pingshuo coal+20% rice straw	554 ~ 627	46.61	360.99	0.993 5	696 ~ 791	26.52	3.38	0.991 0
50% Pingshuo coal+50% rice straw	529 ~ 628	56.01	5 071.59	0.997 0	668 ~ 795	16.01	0.55	0.996 4
30% Pingshuo coal+70% rice straw	480 ~ 685	61.48	3 2862.30	0.999 9	686 ~ 772	11.18	0.36	0.994 7

由表4可知，随着生物质掺混比例的变化，混合物中活化能与指前因子都发生了规律性变化，混合样品的第一段热解活化能和指前因子随着生物质掺混比例的增加而增大，第二段热解活化能和指前因子随着生物质掺混比例的增加而减小，活化能的增加使反应活性降低，但是指前因子的增加又可使反应速率加快，即混合样品热解时活化能和指前因子之间存在补偿效应。将lnA与E呈线性关系的现象，称为动力学补偿效应，对不同掺混比例的活化能和指前因子的关系作图，结果发现，lnA与E之间存在线性关系，得到平朔煤与木屑第一段线性关系式为lnA=0.66561E - 28.86329，其相关系数R<sup>2</sup>=0.9613；第二段线性关系式为lnA=0.1893E - 4.00516，其相关系数R<sup>2</sup>=0.9954。平朔煤与稻秸秆第一段线性关系式为lnA=0.2971E - 7.80472，其相关系数R<sup>2</sup>=0.9811；第二段线性关系式为lnA=0.15841E - 2.95761，其相关系数R<sup>2</sup>=0.9982。用动力学补偿效应参数描述反应过程要比常用的动力学参数好，因为它不受实验条件的影响<sup>[13]</sup>。

平朔煤与木屑混合热解时，随着平朔煤掺混比例的增加，混合样品的第一段热解活化能逐渐减小，且都小于木屑单独热解时的值；同时从混合样品的DTG曲线可以看出，在木屑热解主要温度段，平朔煤已经开始轻微热解，平朔煤热解和木屑热解起了相互促进作用，导致第一段热解活化能随着平朔煤掺混比例增加而减小。平朔煤与稻秸秆混合热解时，随着平朔煤掺混比例的增加，混合样品的第一段热解活化能逐渐减小，但却大于稻秸秆单独热解时的值，说明平朔煤对稻秸秆热解促进作用很小，从混合样品的热解特征参数来看，稻秸秆热解温度较低，平朔煤开始热解时，稻秸秆已经基本热解完全，所以平朔煤对稻秸秆热解促进作用不明显。第二段热解主要是平朔煤热解，随着生物质掺混比例的增加，第二段热解活化能逐渐减小，而且第二段热解活化能都小于平朔煤单独热解时的活化能，热解反应活性比平朔煤单独热解反应活性要高，可能是生物质中碱金属含量和氢含量较高，从而促进平朔煤热解，产生了协同效应。

### 3结论

平朔煤、木屑与稻秸秆单独热解实验曲线包括两个主要失重阶段，水分析出阶段和挥发分析出阶段。木屑和稻秸秆的主要热解温度区间比平朔煤的提前，最大热解速率较平朔煤大，而且最大热解速率对应的温度较平朔煤低。

混合热解过程中，生物质热解失重区域向高温段迁移、平朔煤热解失重区域向低温段迁移。平朔煤的挥发分析出温度和最大热解速率对应的温度随生物质掺混比例的不同而呈现出规律性变化。混合热解时的实际失重速率曲线和按比

例折算后曲线有偏差，并不是单独热解失重速率的简单加和，说明混合热解过程中存在协同效应。

利用一级反应模型较好地描述了平朔煤、生物质及其混合样品的热解行为。平朔煤与生物质混合热解时，第一段热解活化能随着平朔煤掺混比例的增加而减小，第二段热解活化能随着生物质掺混比例的增加而减小，说明平朔煤与生物质之间存在协同效应。

平朔煤与不同生物质混合热解时的生物质热解阶段有所不同，其中，平朔煤对木屑的热解促进作用要比对稻秸秆的热解促进作用明显。

综上所述，平朔煤与木屑/稻秸秆共热解时彼此之间存在协同效应，这是由于生物质中碱金属含量和氢含量较高，而且平朔煤与生物质的热解区间有部分重叠。

#### 参考文献

- [1]宋春财, 胡浩权, 朱盛维, 朱英华. 生物质秸秆热重分析及几种动力学模型结果比较[J]. 燃料化学学报, 2003, 31(4): 311 - 316.
- [2]JONES J M, KUBACKI M, KUBICA K, ROSS A B, WILLIAMS A. Devolatilisation characteristics of coal and biomass blends[J]. J Anal Appl Pyrolysis, 2005, 74(2): 502 - 511.
- [3]WEI L G, ZHANG L, XU S P. Effects of feedback on co - pyrolysis of biomass and coal in a free - fall reactor[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2011, 39(10): 728 - 734.
- [4]阎维平, 陈吟颖. 生物质混合物与煤共热解的协同特性[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 80 - 86.
- [5]COLLOT A G, ZHUO Y, DUGWELL D R, KANDIYOTI R. Co - pyrolysis and co - gasification of coal and biomass in bench - scale fixed bed and fluidized bed reactors[J]. Fuel, 1999, 78(6): 667 - 679.
- [6]PAN Y G, VELO E, PUIGJANER L. Pyrolysis of blends of biomass with poor coals[J]. Fuel, 1996, 75(4): 412 - 418.
- [7]李文, 李宝庆, 孙成功, 尉迟唯, 曹变英. 生物质热解、加氢热解及其与煤共热解的热重研究[J]. 燃料化学学报, 1996, 24(4): 341 - 347.
- [8]李世光, 徐绍平. 煤与生物质的共热解[J]. 煤炭转化, 2002, 25(1): 7 - 12.
- [9]孙学信. 燃煤锅炉燃烧试验技术与方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [10]DARMSTADT H, GARCIA - PEREZ M, CHAALA A, CAO N Z, ROY C. Co - pyrolysis under vacuum of sugar cane bagasse and petroleum residue properties of the char and activated char products[J]. Carbon, 2001, 39(6): 815 - 825.
- [11]武宏香, 李海滨, 赵增立. 煤与生物质热重分析及动力学研究[J]. 燃料化学学报, 2009, 37(5): 538 - 545.
- [12]胡荣祖. 热分析动力学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2008.
- [13]周利民, 王一平, 黄群武, 蔡俊青. 煤/塑料共热解的热重分析及动力学研究[J]. 燃烧科学与技术, 2008, 14(2): 132 - 136.
- [14]陈吟颖. 煤与生物质共热解试验研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2007.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/113112.html>