

煤与生物质掺混燃烧特性实验

王华山，孙环，王跃康，王春生，刘华

(燕山大学车辆与能源学院，河北秦皇岛066000)

摘要：为缓解煤炭资源紧张，在煤中掺烧生物质是一种很好的解决方式。本文利用综合热分析仪，在不同条件下，对煤（兰炭、神府烟煤、大同无烟煤）和生物质（大豆秆、小麦秆）以及二者混合物的燃烧过程进行了实验研究。结果表明：在一定范围内，随着生物质添加比例增大，兰炭的燃烧特征温度降低，综合燃烧特性指数增大；当生物质添加比例为50%时，混合样品的着火温度基本接近生物质的着火温度；升温速率增大，兰炭与大豆秆的掺烧向高温区移动，综合燃烧特性指数和燃尽特性指数增大。该实验结果对降低煤的着火温度以及改善煤炭资源紧张提供了依据。

近年来，因电力需求急剧增加，煤炭相对短缺的现象非常严重^[1]

。随着我国能源紧张，煤炭价格上涨，兰炭的生产受到越来越多的关注。兰炭是煤转换的产品，是无黏性或弱黏性的高挥发分烟煤在低温条件下干馏热解，得到的较低挥发分的固体炭制产品，具有固定碳高、电阻率高、化学活性高、灰分低、硫低、磷低、水分低等“三高四低”的优点^[2]

，可单独作为大型煤粉锅炉燃料或者掺烧燃料，但防结渣是需重点考虑的问题^[3-5]

。生物质与煤的掺混燃烧是生物质能利用的一种重要方式^[6-7]，已经引起了国内外学者的广泛关注。Edward Lester等^[8]研究了升温速率对生物质与煤掺混燃烧特性的影响。

高佳佳等^[9]

对新型低煤分生物质混合燃料进行实验研究，结果表明掺混可以改善燃料的燃烧、燃尽及污染物的排放特性。马爱玲等^[10]对生物质、煤单烧及混烧进行了热重分析。王晓钢等^[11]

对冷压成型麦秆与煤混烧进行了研究。杜一帆等^[12]研究了稻壳与不同煤种混燃的燃烧特性。

本文利用综合热分析仪，在考虑生物质种类和生物质比例对煤燃烧特性影响的基础上，重点对兰炭与大豆秆的掺混燃烧特性进行研究。

1 实验装置与方法

1.1 实验装置

本文对兰炭、神府烟煤以及大同无烟煤3种煤，小麦秆、大豆秆2种生物质进行实验研究，其工业分析见表1。

表 1 样品工业分析

Tab.1 Industrial analysis result of the samples w/%

样品	M _{ar}	A _{ar}	V _{ar}	FC _{ar}
兰炭	7.53	5.97	6.44	80.06
神府烟煤	8.15	9.33	34.92	47.60
大同无烟煤	3.71	9.31	9.45	77.53
小麦秆	9.83	4.62	71.16	14.39
大豆秆	11.20	12.63	62.82	13.35

实验样品的制备主要经过破碎、研磨和筛分3个过程。首先将样品敲碎成粒径小于1cm；然后用小型粉碎机对其进行粉碎，得到粉状样品；最后用孔径200 μm的标准试验筛对得到的粉状样品进行筛分，取粒径小于200 μm的样品进行实验研究。

综合热分析仪将热重分析和差热分析合为一体，可以在1次实验中同步得到被测物质的热重信息和差热信息。每次实验样品的质量控制在 (10 ± 0.5) mg。实验气氛为空气，气体压力为0.1MPa，流量为40mL/min。通常情况下，以20 /min的升温速率由室温升至1000 。

1.2实验方法

采用TG-DTG联合定义法^[13-15]

确定一些特征参数。着火温度定义如图1所示。过DTG曲线的极值点A作垂线与TG曲线交于点B，过点B作TG曲线的切线L1，该切线与失重开始时平行线L2的交点i所对应的温度为着火温度。若DTG曲线有多个峰值，过第1个峰作垂线与TG曲线的交点来确定。燃尽温度指切线L1与TG曲线上燃烧结束后的水平线L3的交点h所对应的温度。最大燃烧速率温度即为点A所对应横坐标的温度。最大燃烧失重率为点A的纵坐标所对应的值。

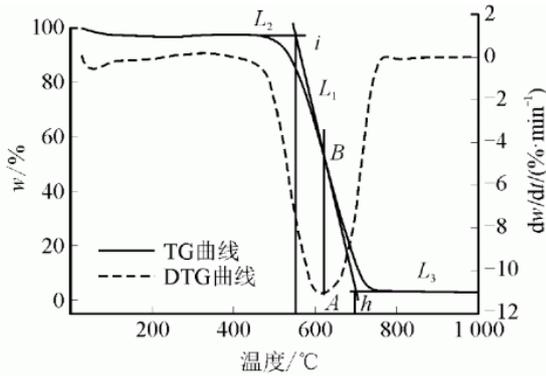


图1 着火温度定义

Fig.1 The definition of ignition temperature

着火特性指数按式(1)计算:

$$Z_i = \frac{W_{ad}(V)(dm/dt)_{max}}{T_i} \quad (1)$$

式中: Z_i 为着火特性指数, $\%^2/(\text{C} \cdot \text{min})$; $W_{ad}(V)$ 为分析基挥发分, $\%$; $(dm/dt)_{max}$ 为最大燃烧速率, $\%/min$; T_i 为着火温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

综合燃烧特性指数^[16-17]按式(2)计算:

$$S_N = \frac{(dm/dt)_{max}(dm/dt)_{mean}}{T_i^2 T_h} \quad (2)$$

式中: $(dm/dt)_{mean}$ 为平均燃烧速率, $\%/min$; T_h 为燃尽温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

平均燃烧速率由式(3)计算:

$$(dm/dt)_{mean} = \beta \cdot \frac{\alpha_i - \alpha_h}{T_h - T_i} \quad (3)$$

式中: β 为升温速率, $^{\circ}\text{C}/min$; α_i 为试样着火时的质量分数, $\%$; α_h 为试样燃尽时的质量分数, $\%$; T_h 为燃尽温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

燃尽特性指数 C_b ^[18]综合考虑了燃料着火和燃烧稳定性等因素对燃尽的影响。燃尽特性指数越大, 燃料的燃尽特性越好。燃尽特性指数 C_b 可用式(4)计算:

$$C_b = \frac{f_1 \cdot f_2}{\tau_0} \quad (4)$$

式中: f_1 为初始燃尽率, 指热重曲线上着火点对应的燃料失重量与燃料中可燃质质量的比值; τ_0 为燃尽时间, 指燃料燃烧失重从开始到燃烧 98% 可燃质的时间; f_2 为后期燃尽率, $f_2 = f - f_1$, f 为 τ_0 时刻所对应的燃料失重量与燃料可燃质质量的比值, 称总燃尽率。

2实验结果与分析

2.1煤和生物质单独燃烧过程

煤和生物质单独燃烧的TG、DTG曲线如图2、图3所示。

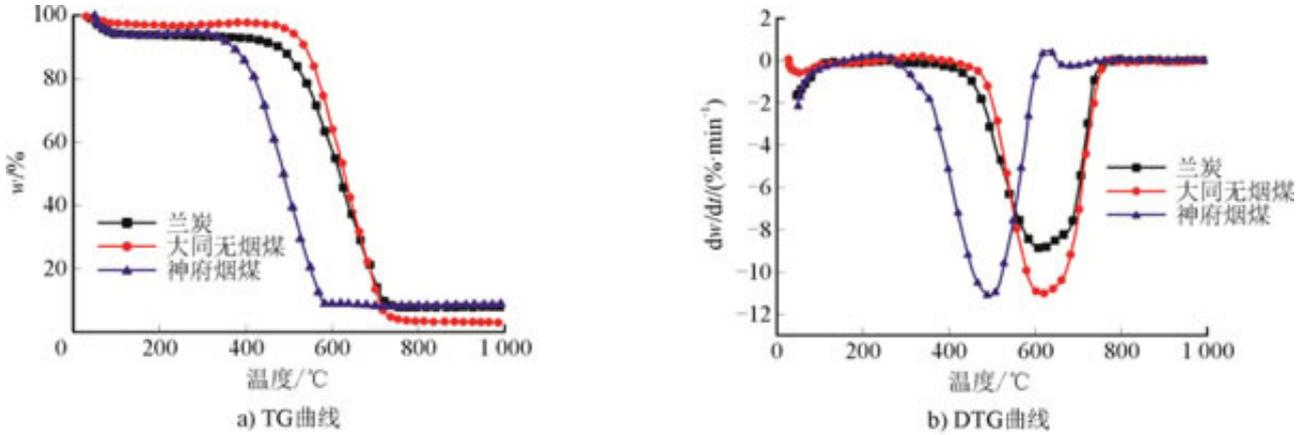


图 2 不同煤种燃烧 TG-DTG 曲线

Fig.2 The combustion TG-DTG curves of different coals

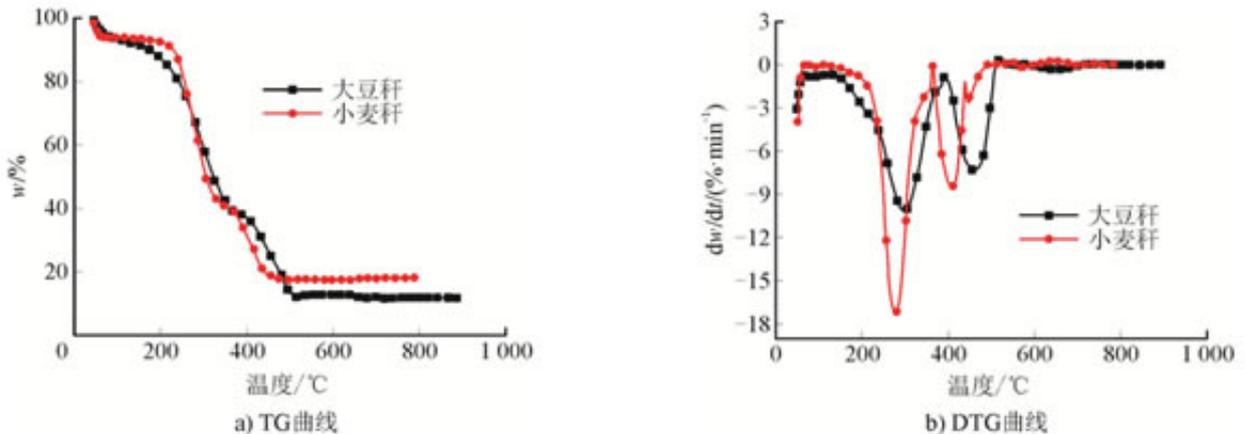


图 3 不同生物质燃烧 TG-DTG 曲线

Fig.3 The combustion TG-DTG curves of different biomasses

由图2可以看出：煤的燃烧过程基本分为失水干燥、挥发分析出及固定碳燃烧两个阶段，由于固定碳含量高于挥发分的含量，挥发分的析出伴随着焦炭的燃烧，因此在DTG曲线看到一个明显的峰；神府烟煤的峰值温度比兰炭和大同无烟煤要低150 左右；兰炭与大同无烟煤的燃烧趋势相似，大同无烟煤的最大燃烧速率最大。

由图3可以看出：生物质的燃烧过程分为失水干燥、生物质中的纤维素木质素裂解以及挥发分释放燃烧、焦炭燃烧3个阶段；生物质中固定碳的含量比挥发分少，2种生物质的第2个峰值比第1个峰值小；小麦秆的挥发分比大豆秆的大，所以其第1个峰值也较大。

3种煤和2种生物质单独燃烧时的燃烧特性参数见表2。

表 2 3 种煤和 2 种生物质的燃烧特性参数
Tab.2 The combustion characteristics of three coals and two biomasses

样品	$T_i/^\circ\text{C}$	$T_b/^\circ\text{C}$	$T_d/^\circ\text{C}$	$(dm/dr)_{\max}/(\% \cdot \text{min}^{-1})$	$Z_d/(\%^2 \cdot (\text{C} \cdot \text{min})^{-1})$	$S_D \times 10^{-7}$	$C_b \times 10^5/\text{s}^{-1}$
兰炭	532.7	697.8	612.3	8.900 85	0.107 6	3.60	8.66
大同无烟煤	546.3	691.3	614.8	11.056 4	0.191 3	5.40	6.06
神府烟煤	412.7	542.2	498.0	11.132 0	0.941 9	11.96	11.30
大豆秆	259.1	479.8	293.1	10.098 3	2.448 4	18.83	14.70
小麦秆	253.0	412.7	276.7	17.291 1	4.863 3	51.86	14.30

由表2可知：生物质的着火温度比煤低159~290，这是因为生物质的挥发分比较多，易燃；生物质的着火特性指数比煤高一个数量级，燃尽特性指数是煤的2倍左右；小麦秆的综合燃烧特性指数非常高；小麦秆的最大反应速率最大，大豆秆、神府烟煤、大同无烟煤比较接近，兰炭最低；神府烟煤比兰炭、大同无烟煤的燃烧性能更好。

2.2煤种对燃烧过程的影响

用大豆秆分别与兰炭、大同无烟煤和神府烟煤按2:8的比例混合燃烧。在升温速率为20 /min，氧体积分数为21%的条件下，3种煤与大豆秆掺烧的TG-DTG曲线如图4所示。

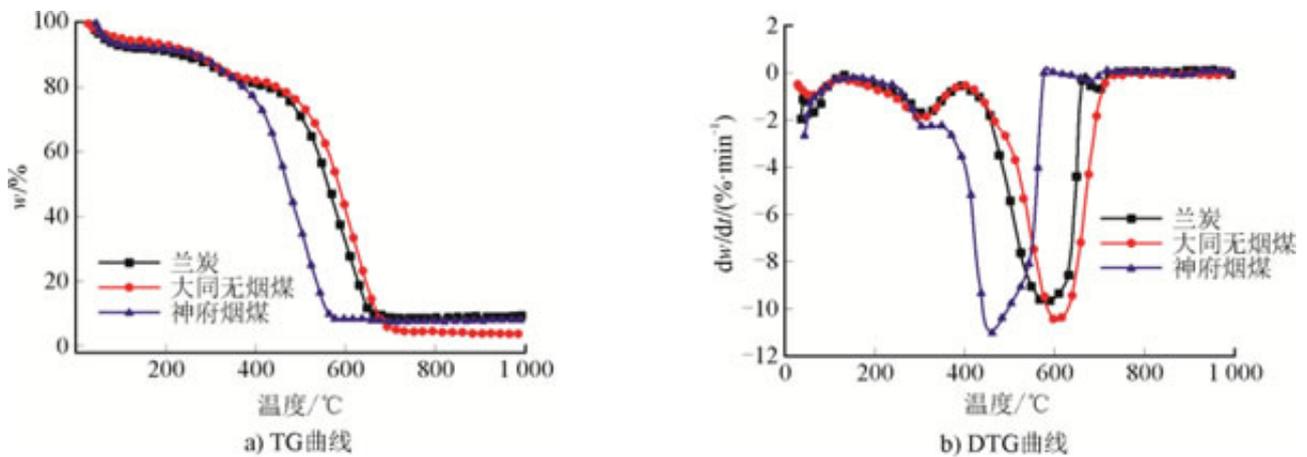


图 4 3 种煤与大豆秆掺烧的 TG-DTG 曲线

Fig.4 The co-combustion TG-DTG curves of three kinds of coal co-fired with soybean stalk

从图4可以看出：掺混燃烧有2个明显的峰，在320 左右出现了第1个峰，这个峰的出现是由于生物质的挥发分析出；另一个峰是固定碳的燃烧过程，与煤单独燃烧时的峰值相差不大，峰值大小取决于煤中固定碳的含量。

3种煤与大豆秆掺烧的燃烧特性参数见表3。

表 3 3 种煤与大豆秆掺烧的燃烧特性参数
Tab.3 The combustion characteristics of three kinds of coal co-fired with soybean stalk

样品 (20%大豆秆+80%)	$T_i/^\circ\text{C}$	$T_b/^\circ\text{C}$	$T_d/^\circ\text{C}$	$(dm/dr)_{\max}/(\% \cdot \text{min}^{-1})$	$Z_d/(\%^2 \cdot (\text{C} \cdot \text{min})^{-1})$	$S_D \times 10^{-7}$	$C_b \times 10^5/\text{s}^{-1}$
兰炭	279.3	629.4	564.1	9.554 0	0.606 1	8.310 4	6.80
大同无烟煤	295.2	675.3	599.3	10.477 0	0.714 1	7.875 9	5.41
神府烟煤	281.9	539.9	460.9	11.038 0	1.585 8	15.501 4	7.41

对比表3与表2可见：煤与大豆秆掺烧的着火温度比煤单独燃烧时明显降低，接近大豆秆的着火温度；煤与大豆秆掺烧的燃尽温度、最大反应速率温度比煤单独燃烧时降低，综合燃烧特性指数有所增加，说明掺混生物质利于燃烧；掺烧的燃尽特性指数稍有降低，说明掺烧后需要注意燃尽问题。

2.3生物质对燃烧过程的影响

兰炭分别与大豆秆、小麦秆按8:2进行混合。在其他条件不变的情况下，探究生物质的种类对兰炭燃烧的影响。兰炭与2种生物质掺烧的TG-DTG曲线如图5所示，掺烧特性参数见表4。由图5可以看出：对于生物质而言，加入兰炭之

后，TG曲线向高温区偏移；DTG曲线的波峰也有了很大的变化，第1个波峰明显低于第2个波峰，这是因为生物质的含量较少，所以其挥发分燃烧占的比例较小；第2个波峰表示兰炭的挥发分和焦炭的含量。

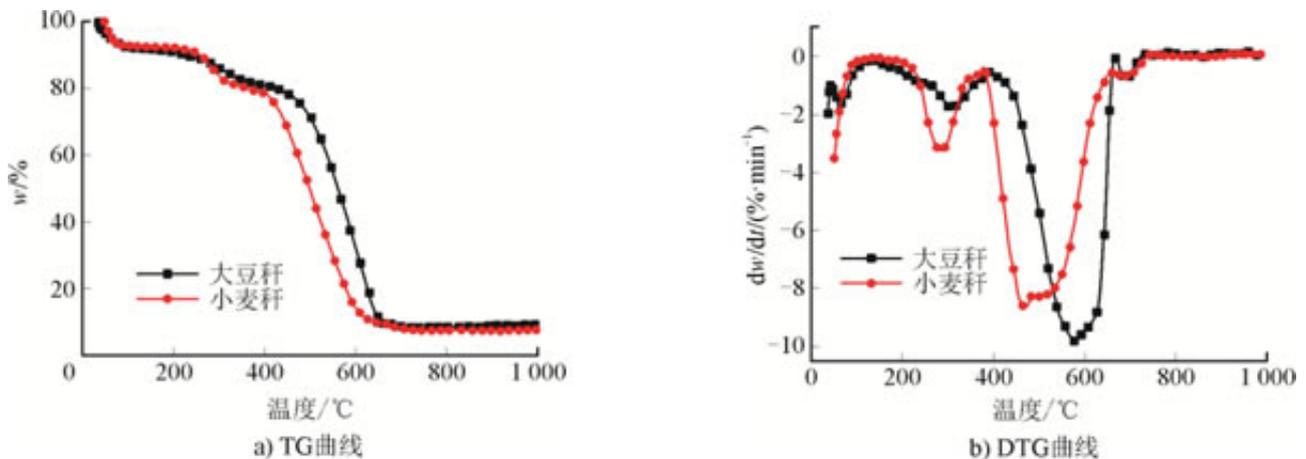


图 5 兰炭与 2 种生物质掺烧的 TG-DTG 曲线

Fig.5 The combustion TG-DTG curves of two kinds of biomasses co-fired with blue-coal

表 4 兰炭与 2 种生物质掺烧特性参数

Tab.4 The combustion characteristics of two kinds of biomasses co-fired with blue-coal

样品 (80%兰炭+20%)	$T_i/^\circ\text{C}$	$T_b/^\circ\text{C}$	$T_A/^\circ\text{C}$	$(dw/dt)_{\max}/(\% \cdot \text{min}^{-1})$	$Z_b/(\% \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1})$	$S_b \times 10^{-7}$	$C_b \times 10^5/\text{s}^{-1}$
大豆秆	279.3	629.4	564.1	9.554 0	0.606 1	8.310 4	6.795 4
小麦秆	256.9	566.4	467.9	8.704 9	0.656 7	10.938 3	6.935 9

对比表4与表2可见：掺混燃烧时着火温度相比兰炭单独燃烧时降低了很多；但比大豆秆和小麦秆单独燃烧时的着火温度要高一些，其中小麦和兰炭掺烧的着火温度更接近小麦单独燃烧的着火温度；燃尽温度比煤单独燃烧的燃尽温度低；综合燃烧特性指数比兰炭单独燃烧高很多，但比生物质单独燃烧低；燃尽特性指数和兰炭单独燃烧相近。

2.4 生物质添加比例对燃烧过程的影响

其他条件不变，大豆秆的添加比例为10%、20%、30%、40%、50%时，掺混燃烧的TG-DTG曲线如图6所示。

由图6可以看出：随着大豆秆比例的增加，TG曲线向低温方向移动；DTG曲线上有很明显的2个波峰。第1个波峰是随着掺烧比例增加，峰值变大，因为大豆秆挥发分的比重变大；第2个峰值则随着大豆秆比例的增加变小，因为兰炭的含量降低，固定碳所占的比例降低。

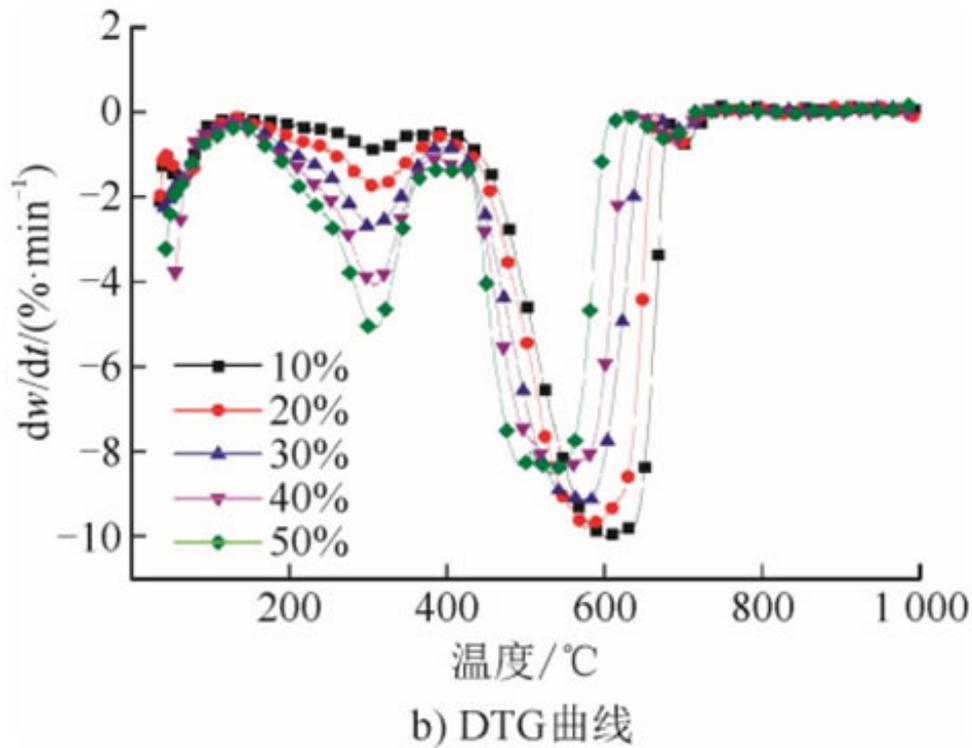
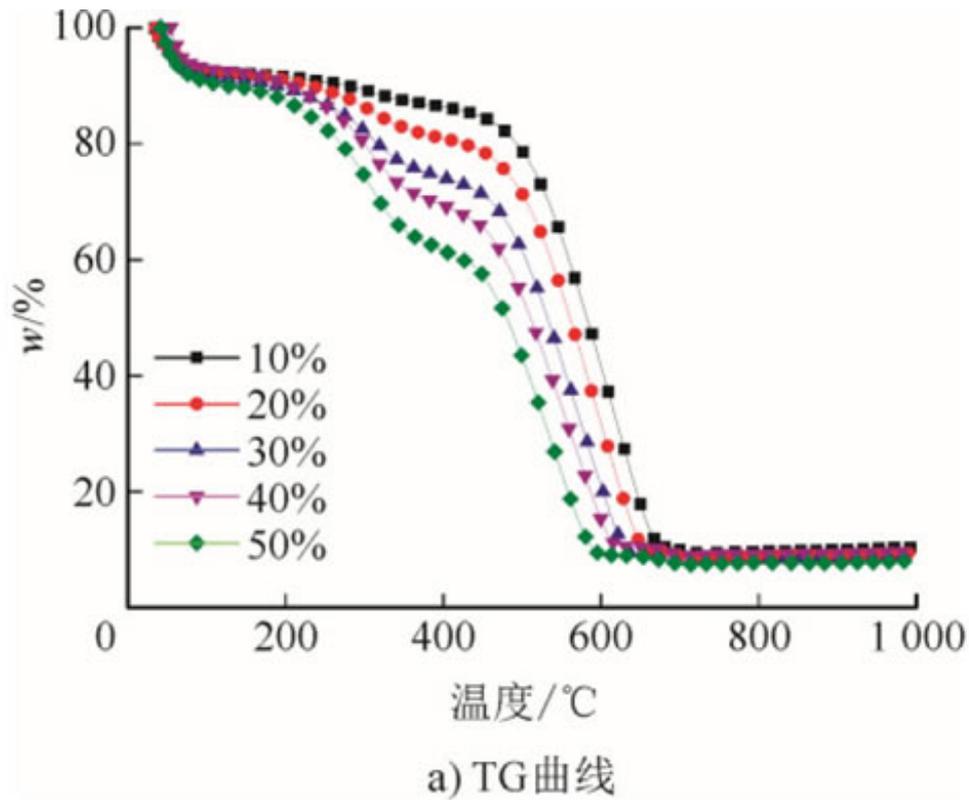
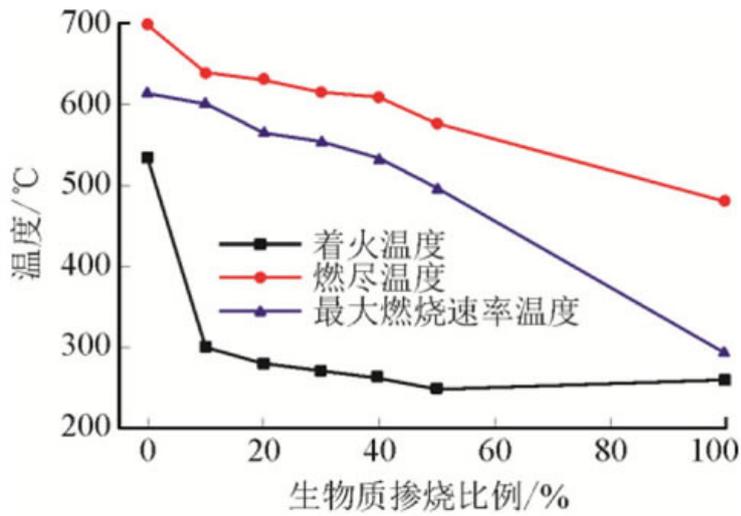
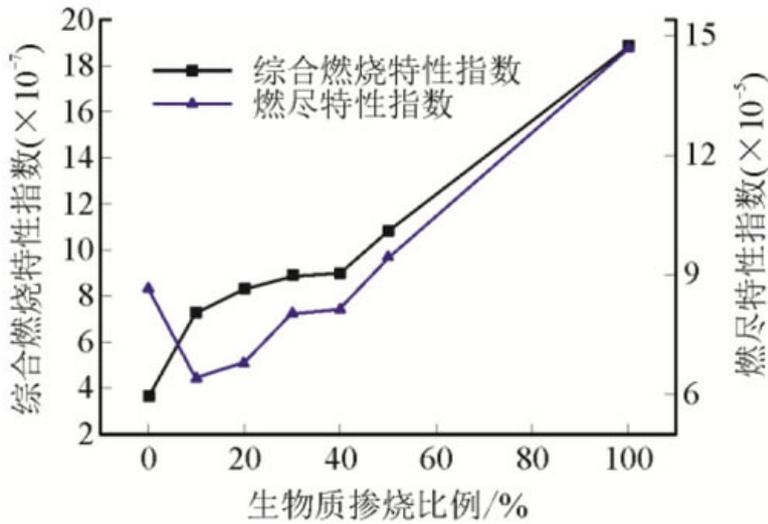


图 6 掺混不同比例大豆秆燃烧的 TG-DTG 曲线
Fig.6 The combustion TG-DTG curves of soybean stalk with different mass fractions

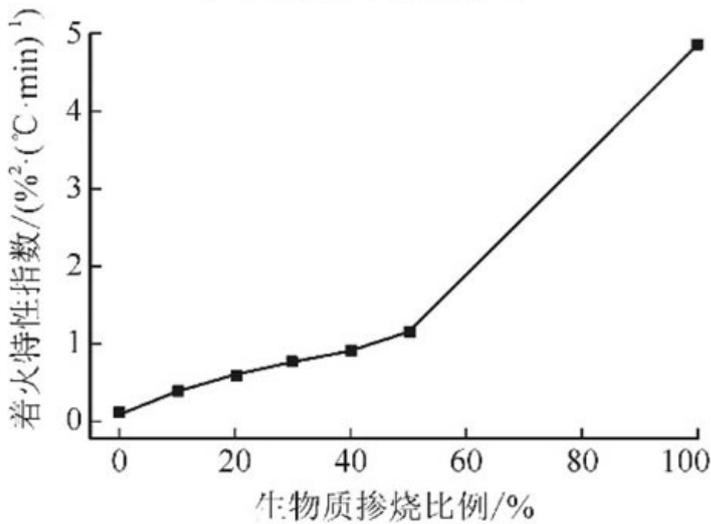
不同比例大豆秆和兰炭掺烧的燃烧特性参数对比如图7所示。从图7可以看出：掺烧的着火温度、燃尽温度、最大燃烧速率温度均较单独燃烧时有所降低，但最大燃烧速率温度和燃尽温度降低幅度不大，与加入大豆秆的比例基本上成正比降低；当掺烧比例大于50%时，混合样品的着火温度接近大豆秆的着火温度；随着大豆秆比例的增加，综合燃烧特性指数增大；当掺烧比例低于40%时，燃尽指数低于兰炭单独燃烧，大于40%时，燃尽指数大于兰炭燃尽指数，表明大豆秆和兰炭的掺烧可能会产生某种不易燃尽的物质；随着掺烧比例的增加最大反应速率温度降低，最大反应时间点提前。



a) 对特征温度影响



b) 对燃烧特性指数影响



c) 对着火特性指数影响

图 7 主要燃烧特性参数对比

Fig.7 The main combustion characteristic parameters

2.5升温速率对燃烧过程的影响

以兰炭、大豆秆（8:2）为例，其他条件不变，升温速率为10、15、20、40 /min时兰炭和大豆秆混燃特性的TG-DTG曲线如图8所示。由图8可以看出，随着升温速率的增大，燃烧反应的TG曲线向温度高的方向偏移，DTG曲线上每个峰的峰值变大。因为升温速率增大，达到相同的温度，所需要的时间变短，样品中的成分（水分、灰分、固定碳等）在达到析出的时间或燃烧温度之前来不及挥发，而在较短的时间内集中析出，所以燃烧速率变快，峰值变大。

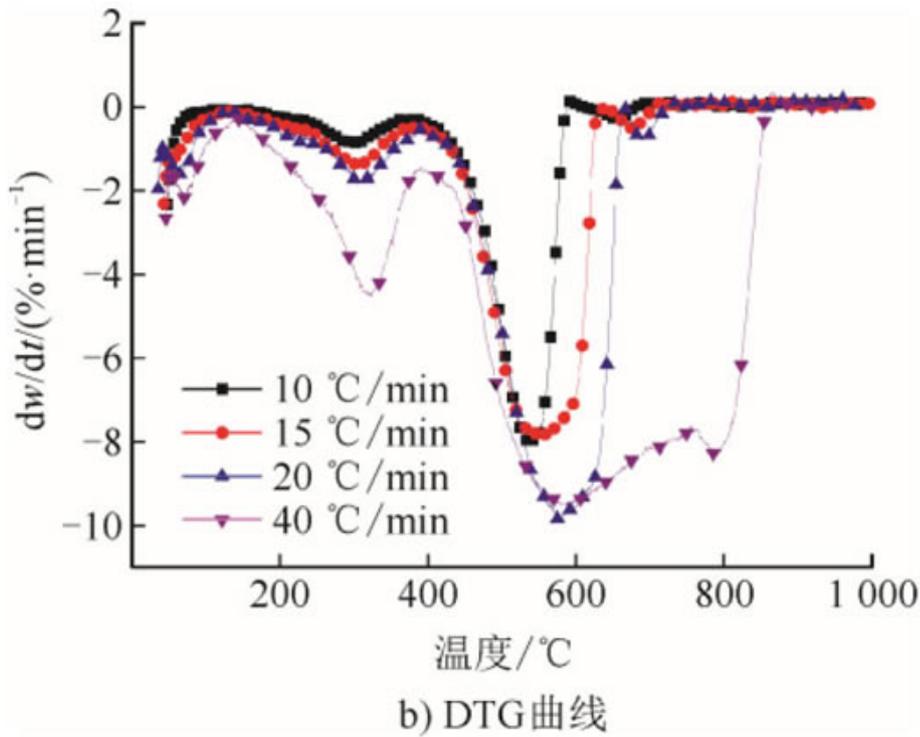
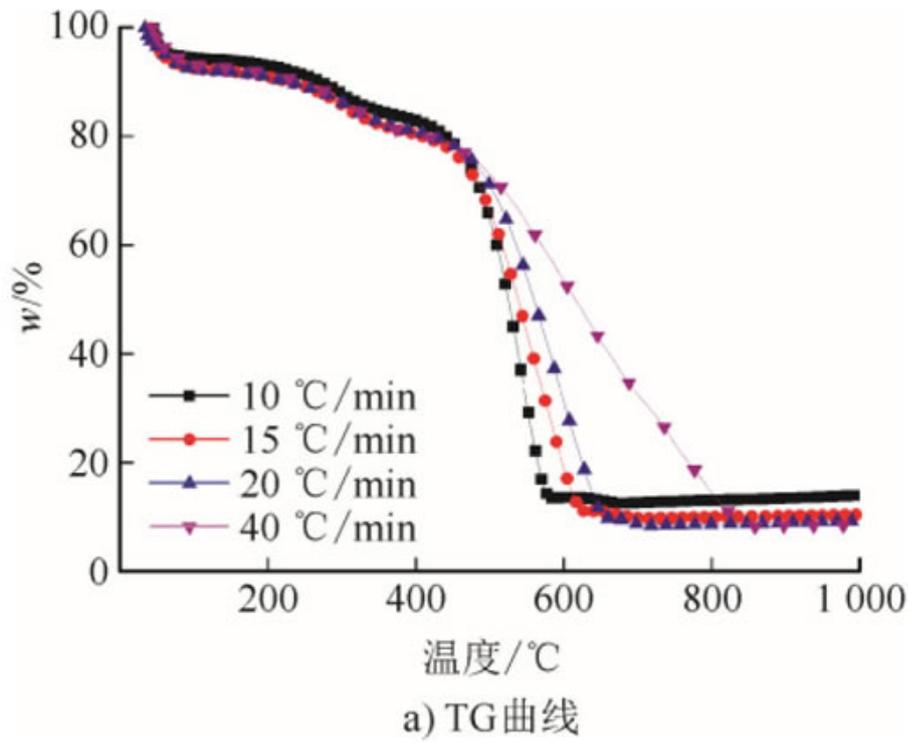


图 8 不同升温速率燃烧的 TG-DTG 曲线
Fig.8 The combustion TG-DTG curves at different heating rates

不同升温速率燃烧特性参数对比如图9所示。由图9可以看出：随着升温速率的增大，着火温度、燃尽温度和最大燃烧速率温度都升高，说明反应向高温区域移动；当升温速率达到40 /min时，温度增加的比例较大；升温速率增大，综合燃烧特性指数增大，当升温速率大于20 /min时，综合燃烧特性指数基本上稳定；燃尽指数大致随着升温速率增大呈线性增加，说明升温速率有利于混合物质的燃尽，提高燃烧速率。

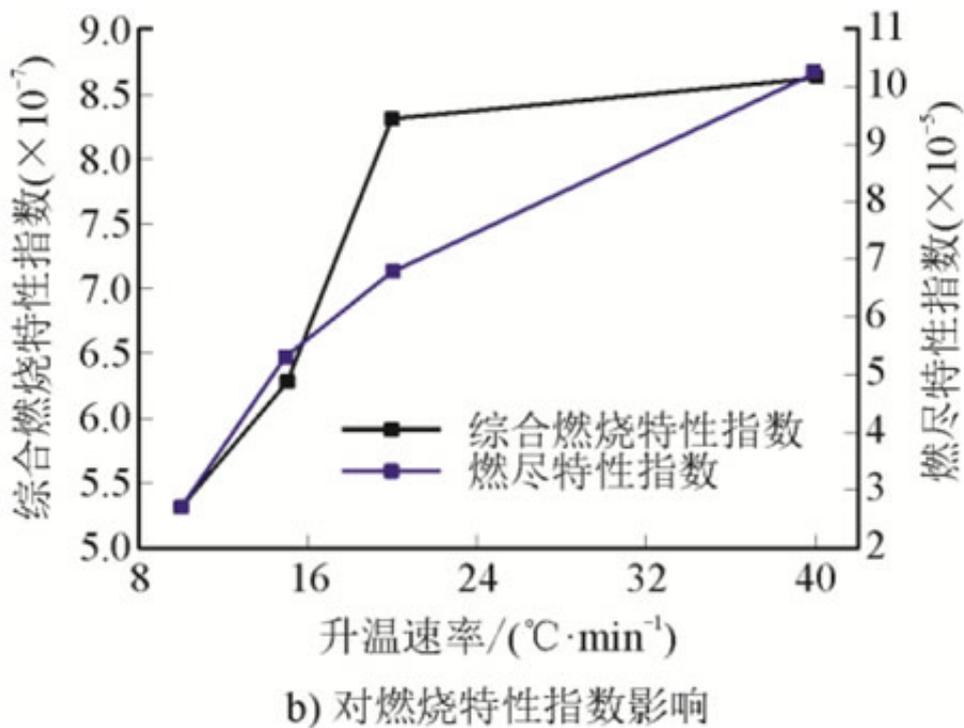
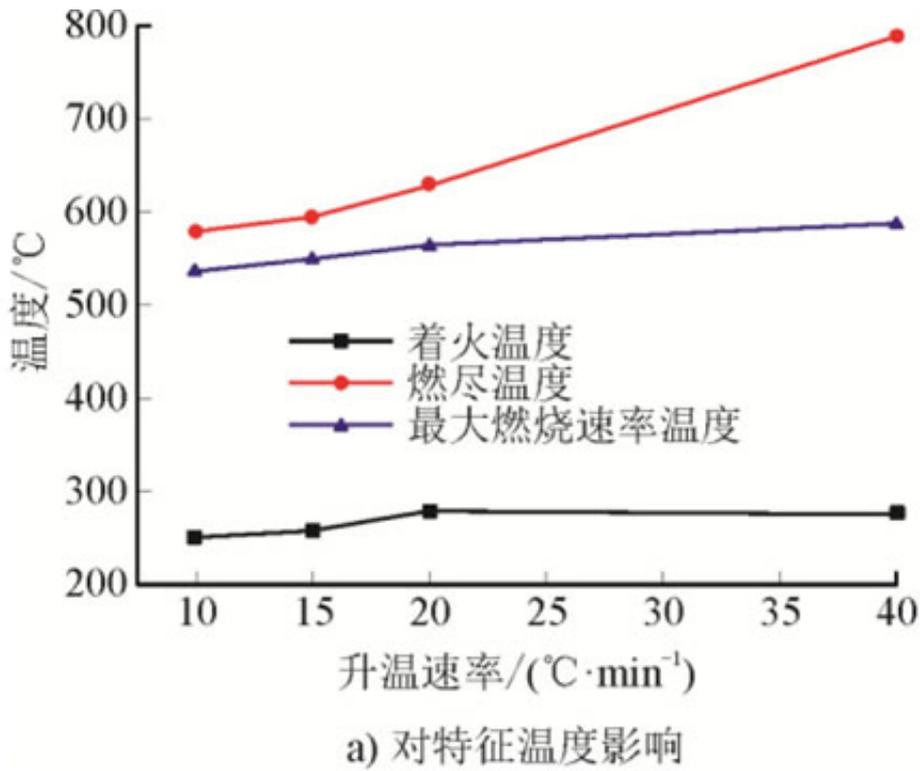


图 9 不同升温速率燃烧特性参数对比

Fig.9 The combustion characteristic parameters at different heating rates

3结论

1) 生物质的燃烧过程和煤的燃烧过程有所差别，生物质的着火温度比煤低150~290，燃尽特性指数、综合燃烧特

性指数较高。

2) 3种煤中加入生物质后，煤的燃烧特性参数变化趋势一致，但是对不同的煤种，燃烧特性参数的变化量不同。兰炭中加入大豆秆

后，比兰炭单独燃烧时，着火温

度降低了253.4，综合燃烧特性指数增加了 4.71×10^{-7}

。添加生物质后，混合样品的着火温度接近生物质的着火温度。煤中固定碳的含量越大，煤的综合燃烧性能改善得越多。

3) 随着生物质掺入比例的增大，兰炭和大豆掺烧的着火温度、燃尽温度降低，综合燃烧特性指数、燃尽特性指数升高，整个反应的燃烧向低温区移动，改善了兰炭的燃烧特性。

4) 综合各燃烧特性指数来看，兰炭中添加生物质的比例为20%较好。随着升温速率增大，反应向高温区偏移，反应速率增大，但是升温速率不宜过大，升温速率为20 /min时比较适宜。

[参 考 文 献]

- [1] 牛冲槐, 任朝江. 我国煤炭能源供求紧张局势分析与对策[J]. 中国能源, 2004, 26(2): 34-37.
- [2] Aspen Technology. Getting started modeling processes with solids[M]. USA: Aspen Technology, 2006: 55-57.
- [3] 吴宽鸿, 苗文华. 关于兰炭强度的讨论[J]. 煤炭加工与综合利用, 2014(8): 44-45.
- [4] 刘家利, 杨忠灿, 王志超, 等. 兰炭作为动力用煤的燃烧性能研究[J]. 洁净煤技术, 2016, 22(2): 84-88.
- [5] 李建锋, 郝继红, 吕俊复, 等. 循环流化床锅炉掺烧生物质前景研究[J]. 电站系统工程, 2007, 23(6): 37-39.
- [6] SAMI M, ANNAMALAI K, WOOLDRIDGE M. Co-firing of coal and biomass fuel blends[J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2001, 27(2): 171-214.
- [7] DEMIRBAS A. Sustainable cofiring of biomass with coal[J]. Energy Convers Manage, 2003, 44: 1465-1466.
- [8] LESTER E, GONG M, THOMPSON A. A method for source apportionment in biomass /coal blends using thermos-gravimetric analysis[J]. Journal of Analytical and Applied Paralysis, 2007, 80: 111-117.
- [9] 高佳佳, 覃建果, 魏小林, 等. 新型低煤份生物质混合燃料燃烧特性实验[J]. 热力发电, 2017, 46(12): 61-67.
- [10] 马爱玲, 谌伦建, 黄光许, 等. 生物质与煤混烧燃烧热性研究[J]. 煤炭转化, 2010, 33(1): 55-60.
- [11] 王晓钢, 鲁光武, 路进升. 生物质与煤掺烧燃烧特性的实验研究[J]. 可再生能源, 2014, 32(1): 87-92.

- [12] 杜一帆, 于敦喜, 吴建群, 等. 稻壳与不同煤种的混燃特性研究[J]. 热力发电, 2016, 45(8): 6-13.
- [13] 谌伦建, 赵跃民. 工业型煤燃烧与固硫[M]. 徐州: 矿业大学出版社, 2001: 5-60.
- [14] 周军, 张海, 吕俊复. 不同升温速率下石油焦燃烧特性的热重分析[J]. 煤炭转化, 2006, 29(2): 39-43.
- [15] 邹学权, 王新红, 武建军, 等. 用热重-差热-红外光谱技术研究煤粉的燃烧特性[J]. 煤炭转化, 2003, 26(1): 71-73.
- [16] 肖军, 段菁春, 王华, 等. 生物质与煤共燃研究(II)燃烧性质分析[J]. 煤炭转化, 2003, 26(2): 43-47.
- [17] 姜秀民, 李巨斌, 邱健荣, 等. 超细化煤粉燃烧特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 71-74.
- [18] 王玉召, 李江鹏. 生物质与煤混燃的燃烧特性实验研究[J]. 锅炉技术, 2010, 41(5): 72-74.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/152553.html>