

Co-combustion characteristics and kinetic analyses of rice straw and pulverized coal

Xianjun XING^{1,2,4*}, Zeyu CHEN^{1,2}, Yongling LI³, Chengcheng ZHU^{1,2}, Xuefei ZHANG²

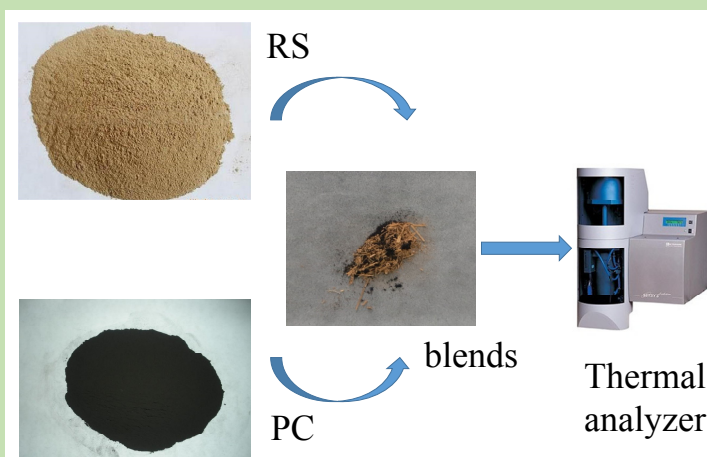
1. School of Automotive and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

2. Advanced Energy Technology and Equipment Research Institute, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China

4. National City Energy Measurement Center (Anhui), Hefei, Anhui 230051, China

Abstract: The synergistic interaction and kinetics of rice straw (RS), pulverized coal (PC) and their blends in the combustion process were investigated in this study. The content of PC in the blends were 30wt%, 50wt% and 70wt%, respectively. The experiments were carried out at different heating rates (10, 20 and 40 °C/min) under air atmosphere with a flow rate of 60 mL/min and the temperature ranged from room temperature to 1000 °C in a thermogravimetric simultaneous thermal analyzer. Meanwhile their activation energy during combustion was studied



by Kissinger–Akahira–Sunose (KAS) and Flynn–Wall–Ozawa (FWO) methods. The results indicated that the RS showed one more weight loss peak than the PC in the derivative thermogravimetric (DTG) curves and the residual mass of RS was lower than PC. The different mass of PC in the samples had no obvious effect on the co-combustion weight loss characteristics at the low temperature stage, but there was significant effect in the high temperature zone. As the heating rate increasing, the DTG curves of all samples were shifted to the high temperature side, resulting in thermal hysteresis. The interaction between RS and PC was inhibited in the temperature range of 320~520 °C. When the temperature was above 530 °C, there existed positive synergistic interaction between the combustion process of RS and PC, especially at 600 °C. The kinetic analysis showed that the values of average activation energies calculated by KAS and FWO methods were highly consistent. When the content of PC was 50wt%, the activation energy reached the lower level, 76.0 kJ/mol by KAS and 83.2 kJ/mol by FWO, which indicated that the chemical reaction was easy to complete.

Key words: rice straw; pulverized coal; kinetics; co-combustion; activation energy

收稿: 2018-09-06, 修回: 2018-10-20, 网络发表: 2018-11-21, Received: 2018-09-06, Revised: 2018-10-20, Published online: 2018-11-21

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划项目(编号: 1704a07020087); 安徽省科技重大专项(编号: 711285941014); 安徽省科技计划项目(编号: 2013AKKG0398)

作者简介: 邢献军(1964-), 男, 安徽省芜湖市人, 博士, 教授, 主要从事高效清洁燃烧及能源转化利用的研究, E-mail: xxianjun@hfut.edu.cn.

引用格式: 邢献军, 陈泽宇, 李永玲, 等. 水稻秸秆与煤粉混合燃烧特性及动力学. 过程工程学报, 2019, 19(3): 637-643.

Xing X J, Chen Z Y, Li Y L, et al. Co-combustion characteristics and kinetic analyses of rice straw and pulverized coal (in Chinese).

Chin. J. Process Eng., 2019, 19(3): 637-643, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.218277.

水稻秸秆与煤粉混合燃烧特性及动力学

邢献军^{1,2,4*}, 陈泽宇^{1,2}, 李永玲³, 朱成成^{1,2}, 张学飞²

- 1. 合肥工业大学汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009
- 2. 合肥工业大学先进能源技术与装备研究院, 安徽 合肥 230009
- 3. 安徽建筑大学机械与电气工程学院, 安徽 合肥 230601
- 4. 国家城市能源计量中心(安徽), 安徽 合肥 230051

摘 要: 采用热重分析法研究了水稻秸秆(RS)、煤粉(PC)及两者不同掺混比的混合物在不同升温速率下(10, 20, 40 °C/min)从室温升至 1000 °C 的燃烧特性, 用 Kissinger-Akahira-Sunose (KAS)法和 Flynn-Wall-Ozawa (FWO)法计算了燃烧过程中的活化能。结果表明, 失重速率(DTG)曲线中 RS 比 PC 多一个失重峰, 且残余质量低。随升温速率增加, 所有样品 DTG 曲线均向高温偏移, 产生热滞后现象。RS 和 PC 在混合燃烧过程中存在协同效应, 且高温区域内更显著。PC 掺混比例为 50wt%时, 混合物平均活化能的计算值较低, 仅为 76.0 kJ/mol (KAS)和 83.2 kJ/mol (FWO)。

关键词: 水稻秸秆; 煤粉; 动力学; 混合燃烧; 活化能

中图分类号: TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2019)03-0637-07

1 前 言

中国已成为世界上第一大能源生产国和消费国, 我国每年秸秆产量有 9 亿吨, 水稻秸秆资源十分丰富, 但生物质能源存在能量密度低和运输困难等缺点, 导致综合利用率较低, 资源浪费且污染环境。水稻秸秆等农副产品的资源化利用对保护环境、节约资源及提高经济等具有重大意义^[1]。煤与水稻秸秆混合燃烧既能有效改善生物质能源利用, 又可降低煤炭资源消耗, 同时治理环境污染。

近年来, 生物质与煤混合燃烧特性研究受到广泛关注, Liu 等^[2]用非等温热重分析法研究了两种草本生物质(甜菜根和柳枝稷)与烟煤的共燃动力学; Yu 等^[3]研究了富氧条件下掺混比和氧气浓度对两种生物质(百慕大草和玉米秆)与烟煤共燃特性和动力学的影响; Yi 等^[4]对生物质与生物炭的共燃行为展开研究, 得出混燃过程中生物炭与生物质之间存在协同作用, 可燃性更好。煤与其它生物质如污泥、油页岩的共燃特性也有研究^[5,6]。对

水稻秸秆与煤粉之间共燃行为及其协同作用的研究较少。

本工作研究了不同掺混比的水稻秸秆与煤粉在 10, 20 和 40 °C/min 升温速率下的混合燃烧特性, 考察了水稻秸秆与煤粉共同燃烧过程中的协同作用, 采用 Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) 法和 Flynn-Wall-Ozawa (FWO)法计算了水稻秸秆、煤粉及其混合物在燃烧过程中的动力学特性参数。

2 实 验

2.1 实验原料

广东粤西地区的水稻秸秆(Rice Straw, RS), 安徽省淮北市某企业用煤粉(Pulverized Coal, PC)。水稻秸秆和煤分别在烘箱中 105 °C 下烘干 12 h, 干燥后用破碎机粉碎, 通过振筛机筛取粒径 50~150 目(106~270 μm)的样品, 其工业分析和元素分析见表 1, O 含量通过差减法获取。

表 1 水稻秸秆与煤粉的工业分析和元素分析
Table 1 Ultimate and proximate analysis of RS and PC samples

Sample	Ultimate analysis/% ¹⁾			Proximate analysis/% ¹⁾				
	Ash	Volatile	Fixed carbon	C	H	O	N	S
Rice straw	13.87	72.89	13.24	39.77	5.53	39.50	1.02	0.31
Pulverized coal	28.06	23.02	48.92	57.11	4.69	8.54	1.31	0.29

Note: 1) Dry basis.

2.2 实验设备与分析仪器

DHG-9070 电热恒温鼓风干燥箱(三发科学仪器有限公司), 8411 型电动振筛机(道土墟越州土工仪器厂), FA124 电子天平(舜宇恒平科学仪器有限公司), MAC-

3000 全自动工业分析仪(国创分析仪器有限公司), VarioEL cube 元素分析仪(德国 Elementar 公司), Setsys Evo TG-DSC/TGA 热重分析仪(法国 SETARAM 公司)。

2.3 实验方法

处理后的 RS 和 PC 以不同比例混合, PC 含量分别为 0, 30wt%, 50wt%, 70wt% 和 100wt%, 样品记作 RS, 30P70R, 50P50R, 70P30R 和 PC, 混合均匀后置于干燥器中。燃烧热重实验采用热重分析仪, 载气流量保持在 60 mL/min, 模拟空气气氛($N_2:O_2=4:1$ 体积比), 每次取样品 10 ± 0.2 mg, 采用非等温法分别以 10, 20 和 40 $^{\circ}C/min$ 的升温速率从室温加热至 1000 $^{\circ}C$ 。实验前进行无样品的空白实验, 且所有实验重复两次, 以减少系统误差和测试误差。实验流程图见图 1。

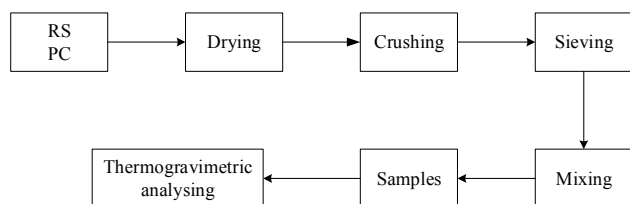


图1 实验流程图

Fig.1 Flow chart of experiment

3 结果与讨论

3.1 水稻秸秆与煤粉单独燃烧特性

图2为RS和PC在20 $^{\circ}C/min$ 升温速率下的燃烧失重和失重速率。由图可知, 燃烧过程中, RS的失重主要分为4个阶段, 失重速率出现3个峰。第1阶段发生在164 $^{\circ}C$ 以下, 主要为水分受热蒸发及汽化, 出现一个相对平缓的失重峰, 质量损失不明显, 这是由于样品含水量较低; 第2阶段在164~386 $^{\circ}C$, 失重速率在300 $^{\circ}C$ 附近出现最大失重峰, 此时燃烧速率最快, 有大量挥发分生成, 主要归因于半纤维素和纤维素的热分解^[7,8]; 第3个阶段在386~537 $^{\circ}C$, 主要是木质素裂解和固定碳的燃烧^[9], 在460 $^{\circ}C$ 附近出现失重峰, 较第2阶段挥发分峰低且范围宽, 这是由于固定碳含量相对较少, 且燃烧不集中; 第4阶段在537 $^{\circ}C$ 以上, 失重平缓, 燃烧反应速率基本为0, 样品燃尽, 燃烧反应结束。

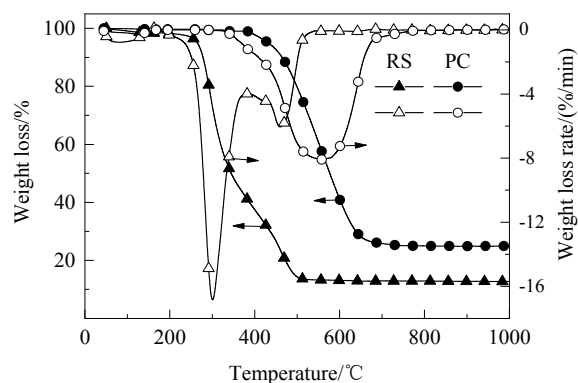


图2 水稻秸秆与煤粉的热重曲线

Fig.2 TG-DTG curves of RS and PC

PC的失重相对缓慢, 出现两个失重峰, 第2失重峰尤为明显, 与RS相比, PC不能明显区分挥发分析出峰和固定碳析出峰, 因为煤中挥发分含量较少, 以固定碳燃烧为主。第1失重峰主要为煤中水分受热脱除, 第2失重峰为煤中固定碳燃烧, 峰值温度约为560 $^{\circ}C$ ^[10]。

3.2 掺混比对燃烧特性影响

图3为升温速率20 $^{\circ}C/min$ 下RS与PC不同掺混比的混合物样品热重曲线。由图3(a)可见, 混合物失重均位于RS和PC单独燃烧失重曲线之间。随混合物中PC含量增加, 失重在约275 $^{\circ}C$ 开始发生明显变化, 失重逐渐减少, 即总失重量逐渐减小, 燃烧后残余质量增加。由图3(b)可见, 最大失重速率随混合样品中PC含量增加而逐渐降低。当混合物中PC含量为30wt%和50wt%时, 出现4个失重峰, 这是由于RS和PC单独燃烧时固定碳失重峰温度不同, 样品30P70R和50P50R在450~600 $^{\circ}C$ 出现2个固定碳失重峰。混合物中PC含量为70wt%时出现3个失重峰, 其中第2失重峰质量损失速率低于第3失重峰, 这是由于此掺混比例中PC含量较高, 燃烧过程中PC起主导作用, 70P30R燃烧过程中的主要质量损失为固定碳燃烧^[11]。

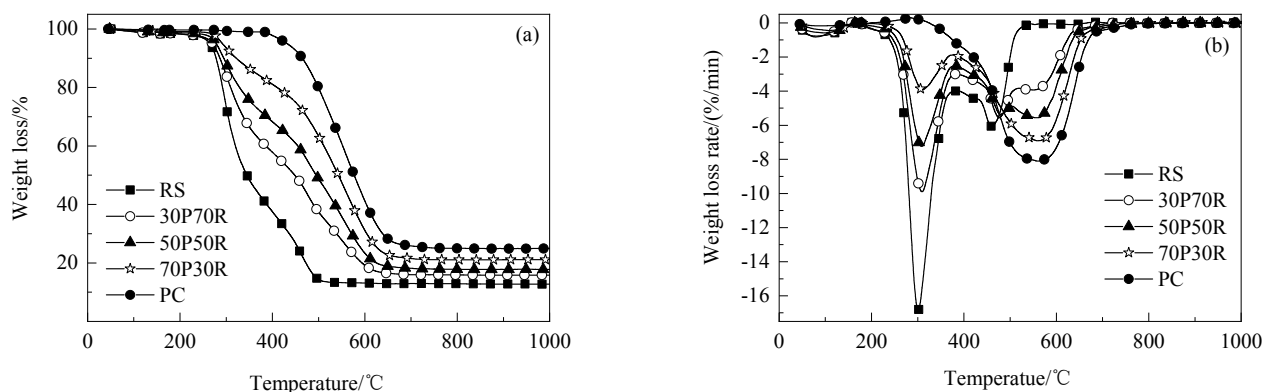


图3 不同掺混比的样品的燃烧热重曲线

Fig.3 Combustion TG-DTG curves of samples with different mass ratio

3.3 升温速率对燃烧特性影响

图4为不同升温速率下RS、50P50R和PC燃烧的热重曲线。由图可知,不同升温速率下同一样品的TG和DTG曲线变化趋势相似。不同升温速率下样品RS、PC及50P50R燃烧残余质量变化不大,表明升温速率对

样品燃烧总失重影响较小。随升温速率增大,样品的最大失重速率明显增大,对应的峰值温度逐渐增加;失重向高温侧移动,这主要是因为燃烧过程中,气体产物逸出需一定时间,升温速率提高时,样品内外温度梯度较大,传热和质量扩散受限导致产生热滞后^[12,13]。

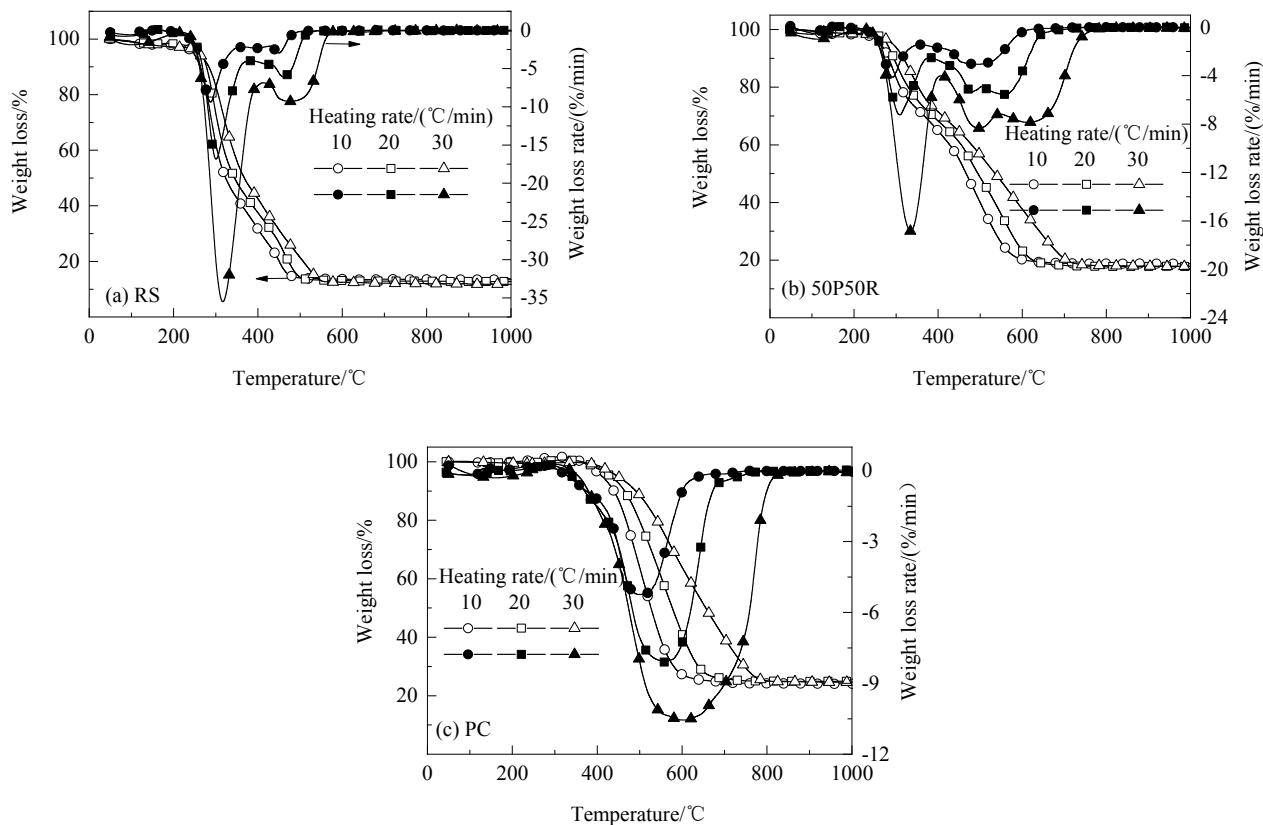


图4 不同升温速率下样品的热重曲线
Fig.4 TG-DTG curves of samples at different heating rates

3.4 燃烧特性分析

为分析水稻秸秆、煤粉及其混合物的燃烧特性,引入综合燃烧特性指数 $S^{[14]}$:

$$S = \frac{(dW/dt)_{\max}(dW/dt)_{\text{mean}}}{T_i^2 T_f} \quad (1)$$

式中, $(dW/dt)_{\max}$ 为最大质量损失速率(%/min), $(dW/dt)_{\text{mean}}$ 为平均质量损失速率(%/min), T_i 为着火温度($^{\circ}\text{C}$), T_f 为燃尽温度($^{\circ}\text{C}$)。

着火温度由热重法得到,即过DTG曲线最大峰值处作垂线与TG曲线相交,过交点作TG曲线切线,切线与TG曲线上质量开始损失处的平行线交于一点,此点对应的温度为着火温度;样品质量损失达到总失重98%时的温度为燃尽温度^[7]。综合燃烧特性指数 S 表征了混合物的燃烧特性, S 越大燃烧特性越好。各样品综合燃烧特性指数见表2。由表可知,随升温速率提高,

各样品的燃烧特性更好,提高升温速率有利于改善样品的燃烧特性。随混合物中PC含量增大,样品着火温度先略微增大,后增幅明显,燃尽温度持续提高。升温速率 $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 下,PC含量从0增至50wt%时,着火温度由 267.73°C 升至 268.57°C ,而PC含量从50wt%增至100wt%,着火温度由 268.57°C 升至 456.75°C 。PC中掺入RS可提高燃烧特性,混合物中PC含量不高于50wt%时,样品的综合燃烧特性指数仍相对较大,可据此确定RS和PC混合燃烧的合适比例。

3.5 水稻秸秆与煤粉混合燃烧过程中协同效应

为分析水稻秸秆与煤粉混合燃烧过程中存在的协同效应,引入了总失重量 W_{total} :

$$W_{\text{total}} = \lambda_{\text{RS}} W_{\text{RS}} + \lambda_{\text{PC}} W_{\text{PC}} \quad (2)$$

式中, λ_{RS} 和 λ_{PC} 分别为混合物中RS和PC含量(wt%), W_{RS} 和 W_{PC} 分别为RS和PC的失重量^[14]。

为比较燃烧过程中理论失重量与实验失重量的差别，引入参数 ΔW ：

$$\Delta W = W_{\text{exp}} - W_{\text{cal}} \tag{3}$$
式中， W_{exp} 和 W_{cal} 分别为实验与理论失重率^[15]。

表 2 样品的燃烧特性参数
Table 2 Combustion characteristic parameters of samples

Sample	$\beta/(\text{°C}/\text{min})$	$T_i/\text{°C}$	$T_f/\text{°C}$	$(dW/dt)_{\text{max}}/(\%/ \text{min})$	$(dW/dt)_{\text{mean}}/(\%/ \text{min})$	$S/\times 10^{-7}$
Rice straw	10	258.60	474.51	9.41	3.61	10.71
	20	267.73	498.43	16.84	6.97	32.85
	40	277.02	543.82	35.52	12.80	108.95
30 Pulverized coal 70 Rice straw	10	259.96	574.94	6.29	2.47	3.99
	20	268.18	618.30	9.90	4.49	9.99
	40	285.42	674.24	23.82	8.34	36.17
50 Pulverized coal 50 Rice straw	10	260.28	596.13	4.14	2.26	2.32
	20	268.57	633.29	7.24	4.26	6.75
	40	288.68	712.73	16.84	7.53	21.35
70 Pulverized coal 30 Rice straw	10	379.89	612.01	3.96	2.48	1.11
	20	400.87	651.52	6.91	4.74	3.13
	40	410.51	731.05	10.24	7.70	6.40
Pulverized coal	10	432.38	627.08	5.23	3.22	1.44
	20	456.75	675.06	8.10	5.99	3.15
	40	460.31	775.47	10.55	8.90	5.71

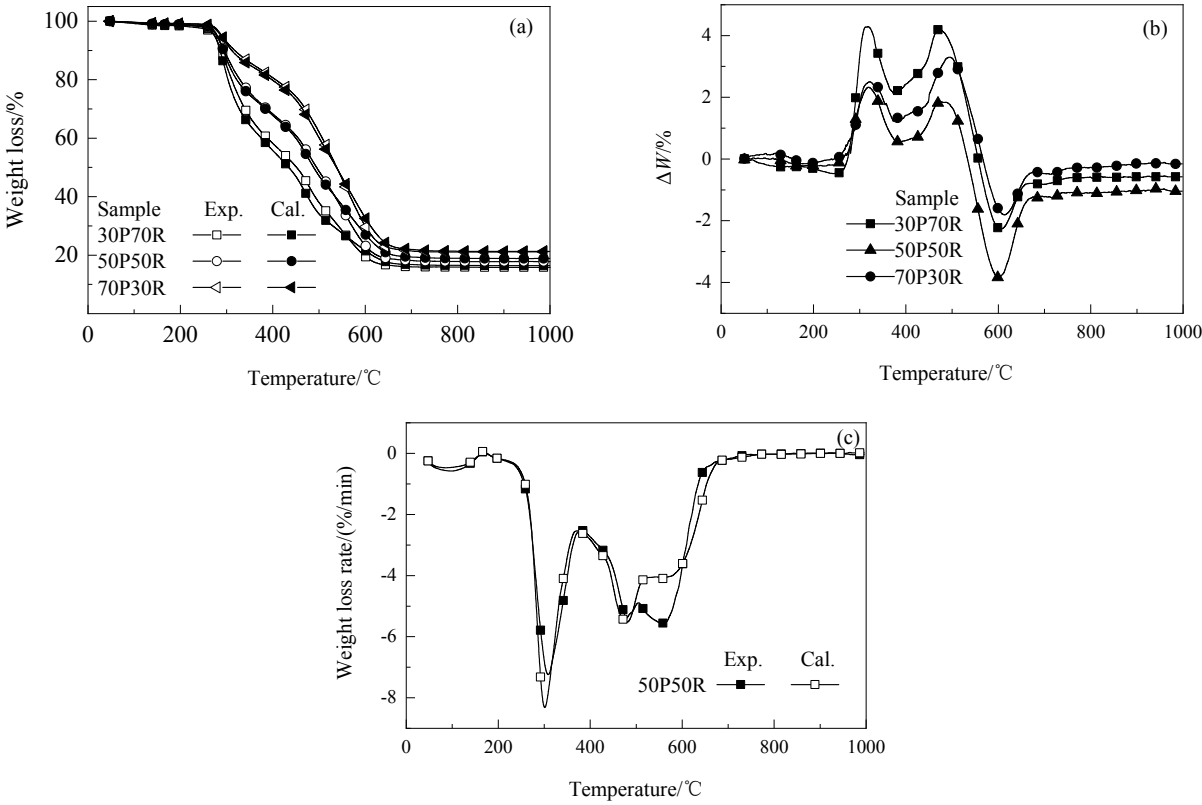


图 5 样品理论与实验热重曲线
Fig.5 Calculated and experimental combustion TG-DTG curves of samples

图 5 为升温速率 20 °C/min 下样品的理论与实验失重、实验与理论失重率差及 50P50R 样品的微商热重曲线。由图 5(a)可见，温度低于 300 °C 时失重率的实验值与计算值吻合较好，温度高于 300 °C 时差别较明显。RS 与 PC 混合燃烧过程中的总失重量不是两者分别燃烧失重量的加权平均值，表明两种组分混合燃烧过程中存在混合协同作用^[16]。由图 5(b)可见，3 种混合物实验与理论失重率差的变化规律相似，300~530 °C 下 $\Delta W > 0$ ，320 和 480 °C 附近有两个波峰，表明该温度范围内 RS 和 PC 共燃过程中存在抑制作用，该温度范围内 RS 处于大分子挥发分与大部分固定碳的燃烧阶段，较难燃烧，所需能量较高，煤粉因热量不足燃烧受抑制。530 °C 以上

$\Delta W < 0$, 表明 RS 和 PC 共燃过程中存在促进作用, 在约 600 °C 时最强。高温下水稻秸秆中一些碱金属和碱土金属物质(K, Na, Ca, Mg 等)可能对煤的燃烧起催化作用, 可减弱聚合链中分子间相互作用, 促进混合物共燃^[17]。PC 含量为 50wt% 时, 两者协同效应更显著。由图 5(c) 可知, 50P50R 失重速率的理论与实验值在 500 °C 以下基本一致, 约 565 °C 时实验值明显高于理论值, 进一步证明 RS 和 PC 混合燃烧过程中高温阶段协同效应明显。

4 动力学分析

水稻秸秆和煤粉的燃烧过程可简化为固体非均相反应, 反应过程可用非等温动力学方程描述:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} f(\alpha) \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4)$$

式中, α 为转化率, T 为热力学温度(K), A 为指前因子 (min^{-1}), β 为升温速率 ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$), E 为活化能(kJ/mol), R 为气体摩尔常数 [$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$], $f(\alpha)$ 为反应动力学机理函数。

$$\alpha = \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_{\infty}} \quad (5)$$

式中, m_0 , m_t 和 m_{∞} 分别为试样初始时刻、 t 时刻和最终时刻的质量(mg)。

通常动力学机理函数 $f(\alpha)$ 的积分形式为

$$g(\alpha) = \int_0^{\alpha} \frac{d\alpha}{f(\alpha)} \quad (6)$$

以 KAS 和 FWO 方法为代表的等转化率法被广泛用于计算活化能^[18,19], KAS 方法基于以下等式:

$$\ln\left(\frac{\beta}{T^2}\right) = \ln\left(\frac{AR}{Eg(\alpha)}\right) - \frac{E}{RT} \quad (7)$$

给定转化率 α , 根据式(7)中 $\ln(\beta/T^2)$ 与 T^{-1} 作线性回归求得斜率, 可计算出不同转化率下的活化能 E 。

FWO 方法基于以下等式:

$$\ln(\beta) = \ln\left(\frac{AE}{Rg(\alpha)}\right) - 5.331 - 1.052 \frac{E}{RT} \quad (8)$$

给定转化率 α , 根据式(8)中 $\ln(\beta)$ 与 T^{-1} 作线性回归求得斜率, 可计算出不同转化率下的活化能 E 。

根据上述方法对混合物样品进行燃烧动力学分析, 得出样品活化能 E 的相关系数 R^2 均大于 0.95, 表明上述动力学模型能较好地模拟 RS 和 PC 混合燃烧过程中的活化能。

图 6 为转化率 $\alpha=0.1\sim0.9$ 时样品的活化能。由图可知, FWO 法和 KAS 法计算的活化能变化趋势一致。RS 单独燃烧时, 燃烧反应所需活化能随转化率增大先减小后增大, $\alpha=0.6$ 时活化能最低, 分别为 81.6 kJ/mol (KAS)

和 87.6 kJ/mol (FWO)。 $\alpha>0.6$ 时木质素及固定碳开始燃烧, 需更多能量, 活化能增加^[20]。PC 的活化能随转化率增大而逐渐减小, 活化能由 128.2 kJ/mol 下降到 56.3 kJ/mol (FWO) 和由 122.8 kJ/mol 下降到 43.8 kJ/mol (KAS)。

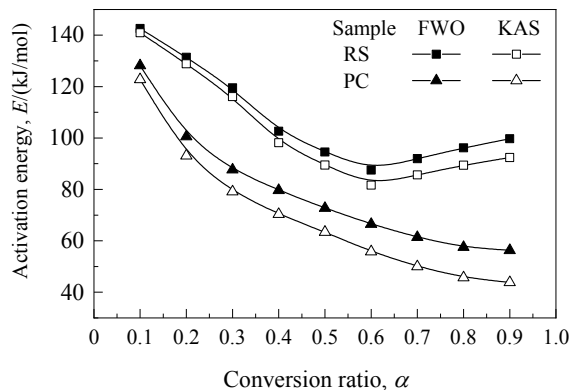


图6 活化能随转化率的变化

Fig.6 Variation of activation energy with conversion ratio

随温度升高, 由于外部能量持续供应和反应热不断积累, 导致后期燃烧阶段大分子中大键能化学键不断被破坏, 促使分布活化能模型假设的下一个单反应总在较小键能下进行, 因此分布活化能随转化率增加而降低^[10]。

图 7 为两种方法计算的平均活化能随煤粉含量的变化。由图可知, 两种方法计算的平均活化能非常接近。随混合物中煤粉含量增大, 混合物平均活化能逐渐减小。煤粉单独燃烧时平均活化能最小, 燃烧反应最易进行。煤粉掺混比为 50wt% 和 70wt% 时, 反应活化能接近且较小, 50P50R 和 70P30R 的活化能 KAS 法计算的分别为 76.0 和 73.6 kJ/mol, FWO 法计算的分别为 83.2 和 82.1 kJ/mol。考虑协同效应, 在满足替代率高且保证燃

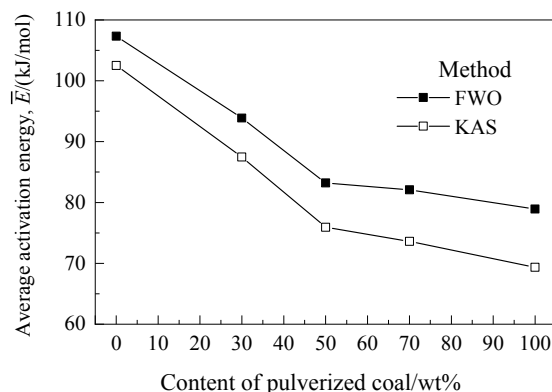


图7 平均活化能随煤粉含量的变化

Fig.7 Variation of average activation energy with content of pulverized coal

烧状况良好的条件下, 结合综合燃烧特性指数 S , PC 含量 50wt%可能是 RS 与 PC 混合燃烧的最佳选择比例。

5 结 论

通过对水稻秸秆与煤粉混合燃烧过程及其动力学研究, 得出以下结论:

(1) 水稻秸秆(RS)燃烧失重速率有 3 个峰, 其中挥发分峰较固定碳峰更尖锐, 煤粉(PC)燃烧有 2 个质量损失峰且固定碳峰更明显, RS 燃烧后残余质量低于 PC。

(2) PC 掺混比例在低温区域内对混合物燃烧失重特性影响不明显, 在高温区域内影响较显著。由于 PC 中的固定碳和灰分含量比 RS 高, 随 PC 含量增加, 样品残余质量增加, 最大失重速率降低。

(3) 升温速率对样品燃烧总失重影响较小, 随升温速率增加, 失重曲线向高温侧偏移, 燃烧平均失重速率变大, 较低的升温速率有助于样品内外温度梯度分布均匀, 促进燃烧反应充分进行。

(4) RS 与 PC 混合燃烧过程中存在相互协同作用, 约 600 °C 下协同作用最强, 混合物中 PC 含量为 50wt% 时, 促进作用更明显。由 KAS 和 FWO 法计算的样品 50P50R 的活化能分别为 76.0 和 83.2 kJ/mol, PC 含量 50wt%可能为 RS 与 PC 共同燃烧的最佳比例。

参考文献

- [1] 田红, 廖正祝. 玉米秸秆与油页岩混烧的热重实验 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 244–250.
Tian H, Liao Z Z. Co-combustion thermogravimetry experiment of corn stalks and oil shale [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(14): 244–250.
- [2] Liu X, Chen M Q, Wei Y H. Kinetics based on two-stage scheme for co-combustion of herbaceous biomass and bituminous coal [J]. Fuel, 2015, 143: 577–585.
- [3] Yu D, Chen M Q. Oxygen enriched co-combustion of biomass and bituminous coal [J]. Energy Sources, 2016, 38(7): 994–1001.
- [4] Yi Q G, Qi F J, Cheng G, et al. Thermogravimetric analysis of co-combustion of biomass and biochar [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2013, 112(3): 1475–1479.
- [5] Niu S B, Chen M Q, Li Y, et al. Co-combustion characteristics of municipal sewage sludge and bituminous coal [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2017, (1): 1–14.
- [6] Li J, Lu J, Zhu Y H, et al. The characteristics of combustion and dynamic analysis of mixed zhundong coal and oil shale semi-coke [C]//Proceedings of 2017 2nd International Conference on Energy, Power and Electrical Engineering. 2017. DOI: 10.12783/dteees/epee2017/18136.
- [7] Fang S W, Yu Z S, Lin Y S, et al. Thermogravimetric analysis of the co-pyrolysis of paper sludge and municipal solid waste [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 101: 626–631.
- [8] Tang Y T, Ma X Q, Lai Z Y, et al. Thermogravimetric analyses of co-combustion of plastic, rubber, leather in N_2/O_2 and CO_2/O_2 atmospheres [J]. Energy, 2015, 90: 1066–1074.
- [9] 巴飞, 胡建杭, 刘慧利, 等. 全氧条件下生物质和塑料共燃烧的热重分析及动力学 [J]. 过程工程学报, 2016, 16(6): 1022–1027.
Ba F, Hu J H, Liu H L, et al. Thermogravimetric analysis and kinetics of biomass and plastic Co-combustion in oxygen enriched environment [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2016, 16(6): 1022–1027.
- [10] 施江, 谢峻林, 梅书霞, 等. RDF 与煤粉混合燃烧特性及动力学分析 [J]. 环境工程学报, 2017, 11(1): 490–496.
Shi J, Xie J L, Mei S X, et al. Combustion characteristics and kinetic analysis of RDF and coal blends [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(1): 490–496.
- [11] 张林海, 薛党琴, 李刚, 等. 农作物秸秆混配燃烧特性与动力学分析 [J]. 农业机械学报, 2014, (增刊 1): 202–206.
Zhang L H, Xue D Q, Li G, et al. Straw mixed combustion characteristics and kinetic analysis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, (S1): 202–206.
- [12] Zhuo Z X, Liu J Y, Sun S Y, et al. Thermogravimetric characteristics of textile dyeing sludge, coal and their blend in N_2/O_2 and CO_2/O_2 atmospheres [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 111: 87–94.
- [13] 曹红亮, 李国强, 黄思涵, 等. 基于等转化率法的牛粪热解动力学特性研究 [J]. 太阳能学报, 2015, 36(7): 1773–1778.
Cao H L, Li G Q, Huang S H, et al. Research on kinetic characteristics of cattle manure pyrolysis using isoconversional methods [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2015, 36(7): 1773–1778.
- [14] Hu S C, Ma X Q, Lin Y S, et al. Thermogravimetric analysis of the co-combustion of paper mill sludge and municipal solid waste [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 99: 112–118.
- [15] Peng X W, Ma X Q, Lin Y S, et al. Co-pyrolysis between microalgae and textile dyeing sludge by TG–FT-IR: kinetics and products [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 100(2): 391–402.
- [16] Tang Y T, Ma X Q, Lai Z Y, et al. Oxy-fuel combustion characteristics and kinetics of microalgae and its mixture with rice straw using thermogravimetric analysis [J]. International Journal of Energy Research, 2018, 42: 532–541.
- [17] Liu Z Y, Wang L H, Jenkins B M, et al. Influence of alkali and alkaline earth metallic species on the phenolic species of pyrolysis oil [J]. Bioresources, 2017, 12(1): 1611–1623.
- [18] Peng X W, Ma X Q, Xu Z B, et al. Thermogravimetric analysis of co-combustion between microalgae and textile dyeing sludge [J]. Bioresource Technology, 2015, 180: 288–295.
- [19] Lin Y, Liao Y F, Yu Z S, et al. Co-pyrolysis kinetics of sewage sludge and oil shale thermal decomposition using TGA–FT-IR analysis [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 118: 345–352.
- [20] Buratti C, Barbanera M, Bartocci P, et al. Thermogravimetric analysis of the behavior of sub-bituminous coal and cellulosic ethanol residue during co-combustion [J]. Bioresource Technology, 2015, 186: 154–162.