造纸污泥与玉米秸秆共热解特性及动力学分析

郭亚东，林晓娜，陈晓云，唐彬彬，付 鹏
（山东理工大学 农业工程与食品科学学院，山东 淄博 255000）

摘 要：为探究造纸污泥与玉米秸秆的共热解特性，文章对造纸污泥、玉米秸秆及其混合物进行了热重分析试验，并采用 Coats-Redfern 积分法对热解过程进行动力学分析。结果表明：造纸污泥与玉米秸秆的热解特性存在显著差异。在 800 ℃时，造纸污泥的残余率较玉米秸秆高 36.59%，但其活化能低于玉米秸秆 24.97 kJ/mol，最大失重速率也较玉米秸秆低 16.78%/min。随着玉米秸秆在混合物中所占比例从 20%提高至 80%，起始分解温度由 259.9 ℃升至 281.8 ℃，最大失重速率由 5.29%/min 增至 15.36%/min，残余率由 56.25%降至 34.09%，活化能由 56.66 kJ/mol 升至 71.27 kJ/mol。通过对比热重(TG)理论值与试验值发现，造纸污泥与玉米秸秆在共热解过程中存在相互作用，该作用对低温区的热解过程表现为抑制，而对高温区的分解过程则具有促进作用。当玉米秸秆添加量为 60%时，两者间的相互促进作用尤为显著。

关键词：造纸污泥；玉米秸秆；共热解；动力学；相互作用
中图分类号：TK6；S216.2 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5292(2026)01-0025-08

0 引言

造纸污泥是制浆造纸废水处理过程中产生的主要副产物之一，含有多种有机物和无机物。其中：有机物以纤维素为主，并含有少量半纤维素、木质素及生物污泥；无机物主要来源于制浆造纸过程中添加的填料(如矾土、$CaCO_3$)、涂料(如高岭土)以及凝聚剂等。此外，造纸污泥中还含有大量病毒、细菌、虫卵和重金属等有害物质，若处置不当，可能对环境造成严重污染[1,2]。随着我国纸及纸板产量逐年增长，造纸污泥的产生量也急剧上升，年均产量已高达 1 500 万 t，而实际有效的处理处置率不足 25%，污泥处理压力日益增大[3]。传统的污泥处置方法如填埋、焚烧等均存在环境污染风险。因此，迫切需要一种能够实现污泥无害化、稳定化、减量化与资源化利用的处理技术。

热解技术能有效减少污泥体积、杀灭病原体、降解有机物，并将重金属固化于生物炭中，是一种具有良好发展前景的污泥处理方式[4]。Lou R[5]通过热重分析将污泥的热失重过程划分为脱水、挥发分析出、炭分解和矿物质分解 4 个阶段，并在 800 ℃下对污泥进行快速热解，得到气体产物产率为 29.78%，液体产物产率为 24.41%，固体产物产率为 45.81%。然而，造纸污泥因其高灰分、低挥发分的特性，单独热解所得生物油产率与热值均较低，难以作为燃料使用；同时，污泥生物炭中残留的重金属也限制了其实际应用价值。与造纸污泥相比，生物质通常具有低灰分、高挥发分的特点。在造纸污泥热解过程中掺入生物质，可弥补其单独热解的不足，提升热解效率，增加液体产物产率，改善产物品质，并有助于钝化污泥炭中的重金属，降低其环境风险[6]。

在生物质与污泥共热解特性方面，国内外学者已开展多项研究。Wang C X[7]研究了污泥与稻壳的共热解行为及动力学特性，发现掺入稻壳能改善污泥的热解性能，且两者之间存在相互作用，在稻壳掺混比例为 30%时平均活化能最低。Wang X B[8]研究表明，污泥与小麦秸秆共热解过程中存在相互作用，掺杂小麦秸秆可加速热解反应，并在掺混比例为 60%时相互作用最为显著。污泥种类多样，包括污水污泥、城市污泥与造纸污泥等，其有机物含量及组成成分存在差异，因而热解特性也有所不同。目前，关于污泥与生物质共热解的研究多集中于污水污泥，而针对造纸污泥与生物质共热解特性及其相互作用机制的系统研究仍较为缺乏。

玉米秸秆作为我国产量最大的农作物秸秆，

收稿日期：2022-10-10。
基金项目：山东省自然科学基金面上项目(ZR2023ME083)。
通信作者：林晓娜(1988-)，女，副教授，硕士生导师，主要从事典型可燃固废资源化利用研究。E-mail：xnlin@sdut.edu.cn

具有来源广泛、污染小、热值高等显著优点。山东省作为农业大省,其玉米秸秆产量位居全国前列。本文以造纸污泥和玉米秸秆为研究对象,利用热重分析仪考察不同掺混比例对两者共热解失重过程及动力学特性的影响,深入探讨共热解过程中的相互作用,以期为造纸污泥与生物质共热解的相关研究提供基础数据支持。

1 试验部分

1.1 试验原料

试验所用造纸污泥(PS)取自山东省淄博市新华造纸厂,玉米秸秆(CS)采自山东省淄博市周边农村。将 PS 与 CS 分别粉碎、过筛,选取粒径为 80~100 目的样品,置于恒温干燥箱中,于 105 ℃条件下干燥 48 h。将干燥后的 PS 与 CS 按质量比 2∶8,4∶6,6∶4 和 8∶2 均匀混合,并依次标记为 8CS2PS,6CS4PS,4CS6PS 和 2CS8PS,用于后续热重分析试验。

1.2 原料表征

原料中:C,H,N 和 S 元素含量采用元素分析仪(EA3000,Italy)测定,O 元素含量通过差值法计算;各组分含量采用工业分析仪(STDGA8000,China)进行测定;典型矿物元素(Si,Ca,Al,Mg,Na 和 K)含量采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES,USA)进行分析。采用傅里叶变换红外光谱仪(Nicolet 5700,USA)对 PS 和 CS 进行红外分析,测量波数为 4 000~400 cm^{-1}。

1.3 热重试验

采用同步热重分析仪(STA 49 F5,Germany)进行热重试验。取约 6 mg 样品均匀平铺于坩埚中,在氮气(纯度 99.99%)氛围下,以 20 ℃/min 的升温速率从室温升至 800 ℃,氮气流量为 50 mL/min。

1.4 分析方法

本文以热重(TG)曲线上失重起始水平线与最大失重速率处切线的交点温度作为起始温度,以失重终止水平线与最大失重速率处切线的交点温度作为终止温度。将最大失重速率对应的温度定义为峰值温度,并将特定温度区间内损失的质量记为失重量。

1.5 混合物的相互作用

为考察 PS 与 CS 在共热解过程中是否存在相互作用,引入 TG 理论值(W_m)与试验值(W_n)的差值 ΔW 作为判断依据。其中,W_m 通过 PS 与 CS 的 TG 数据按混合比例加权平均计算得到。

$$W_m=X_1W_1+X_2W_2 \tag{1}$$

式中:X_1,X_2 分别为混合物中 PS 和 CS 所占的质量分数,%;W_1,W_2 分别为相同条件下 PS 和 CS 单独热解时对应的残余质量分数,%。

1.6 动力学分析

采用 Coats-Redfern 法进行动力学分析,该方法是研究固体燃料热解过程的常用手段,适用于计算 PS,CS 及其混合物热解反应的活化能与指前因子,进而探究其热解特性。

Arrhenius 公式反映了反应速率常数 k 与活化能 E 之间的关系。

$$k=A\exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \tag{2}$$

式中:A 为指前因子,min^{-1};R 为气体常数,R=8.314 J/(mol·K);T 为反应温度,K。

考虑到该常数的具体含义不够明确,通常需对公式进一步变换,从而推导出适用于 Coats-Redfern 法的计算表达式为

$$\frac{d\alpha}{dt}=\frac{A}{\beta}\exp\left(-\frac{E}{RT}\right)f(\alpha) \tag{3}$$

式中:α 为转化率,$\alpha=(W_0-W_t)/(W_0-W_f)$,$W_0$,$W_t$,$W_f$ 分别为样品热解初始质量、热解时间 t 时的质量、热解 800 ℃时的最终质量,mg;β 为升温速率,$\beta=dT/dt$,℃/min;$f(\alpha)$为反应机理函数。

由于造纸污泥热解符合一级反应,而生物质作为固体燃料,其热解过程通常也可视为一级反应,因此造纸污泥与生物质的混合体系热解同样可按一级反应处理[9],即 $f(\alpha)=1-\alpha$。代入式(3)后,积分得到:

$$\ln\left[\frac{-\ln(1-\alpha)}{T^2}\right]=\ln\left[\frac{AR}{\beta E}\left(1-\frac{2RT}{E}\right)\right]-\frac{E}{RT} \tag{4}$$

考虑到通常在反应温度区间及大多数活化能取值条件下,$2RT/E\ll1$,式(4)可近似简化为

$$\ln\left[\frac{-\ln(1-\alpha)}{T^2}\right]=\ln\left(\frac{AR}{\beta E}\right)-\frac{E}{RT} \tag{5}$$

因此,$\ln\left[\frac{-\ln(1-\alpha)}{T^2}\right]$与$\frac{1}{T}$成线性关系,斜率为$-\frac{E}{R}$,截距为 $\ln\left(\frac{AR}{\beta E}\right)$,可得 E 值和 A 值。

2 结果与讨论

2.1 原料表征结果

原料的元素分析与工业分析结果见表 1。PS

表 1　原料元素分析和工业分析

Table 1 Ultimate and proximate analysis of raw materials

%

原料	元素分析(空气干燥基)					工业分析(干燥基)		
	C	H	O(差值法)	N	S	灰分	挥发分	固定碳
PS	24.81	2.42	24.43	1.32	0.96	46.06	45.23	8.71
CS	46.33	6.11	43.62	0.79	0	3.15	83.06	13.79

中 C,H,O 3 种元素的含量均低于 CS，而 N 与 S 元素含量则高于 CS。PS 的灰分含量高达 46.06%，挥发分含量为 45.23%;CS 则相反,其灰分含量仅为 3.15%,挥发分含量高达 83.06%。原料中主要矿物元素的分析结果见表 2。CS 中 K 元素含量高于 PS,其余元素含量均显著低于 PS,这主要因为 PS 中含有大量二氧化硅、碳酸钙、铝硅酸盐以及少量金属氧化物等矿物质。

表 2　原料矿物元素分析

Table 2 Mineral element analyses of raw materials

mg/kg

原料	Si	Ca	Al	Fe	Mg	Na	K
PS	155 511	85 922	48 292	14 220	43 934	5 617	3 832
CS	20 663	5 012	52	67	3 092	81	19 612

图 1 为原料的 FTIR 谱图，样品的热解特征参数见表 3。PS 与 CS 在 3 409 cm^{-1} 附近均出现归属于O–H 伸缩振动的宽强吸收峰，且 PS 的峰强度明显低于 CS,这与 CS 含有较多羟基有关;在 2 924 cm^{-1} 处均可见烷烃 C–H 伸缩振动峰;1 763 cm^{-1} 处的吸收峰归属于 C=O 伸缩振动;1 642 cm^{-1} 处为 C=C 伸缩振动峰;1 484 cm^{-1} 处的吸收峰来源于苯环骨架伸缩振动，且 PS 在此处的峰强度明显高于 CS,表明 PS 中存在大量木质素结构;1 039 cm^{-1} 处为 C–O–C 伸缩振动峰;885 cm^{-1} 附近为 C–H 弯曲振动峰。此外,CS 在 1 248 cm^{-1} 处还出现了由 C–C 骨架伸缩振动引起的特征吸收峰。

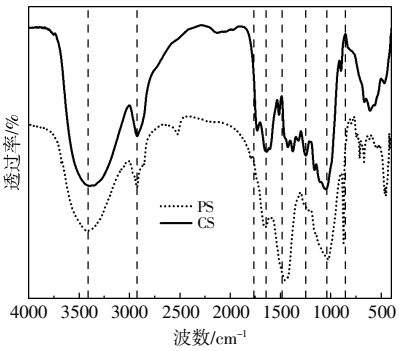


图 1　原料的 FTIR 谱图

Fig.1 FTIR spectra of raw material

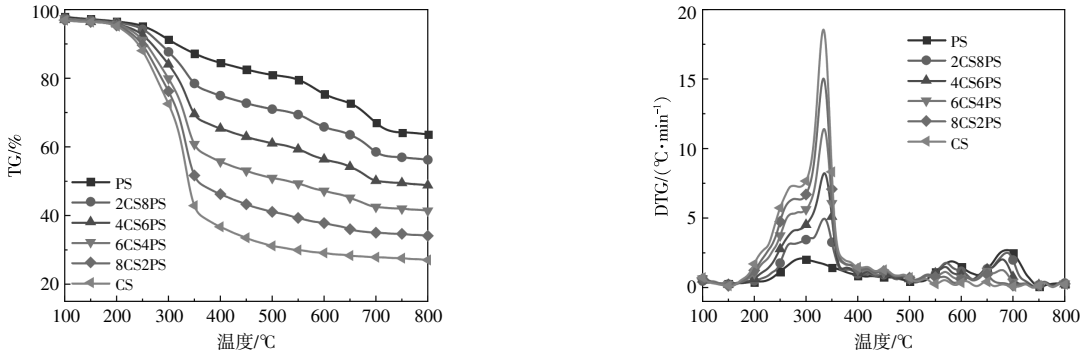
表 3　样品的热解特征参数

Table 3 Pyrolysis characteristic parameters of samples

样品	峰	起始温度/℃	峰值温度/℃	终止温度/℃	最大失重速率/(%·min^{-1})	失重量/%	800 ℃时残余率/%
PS	1	238.0	278.8	402.5	2.19	11.26	63.66
	2	546.5	577.9	610.3	2.16	5.27	
	3	655.6	679.5	713.4	3.27	7.10	
2CS8PS	1	259.9	333.2	368.3	5.29	16.62	56.25
	2	539.1	568.9	608.4	1.75	4.51	
	3	651.8	691.5	710.3	2.58	5.64	
4CS6PS	1	270.3	337.5	367.8	8.45	22.18	48.82
	2	533.8	563.1	605.0	1.52	3.92	
	3	645.8	679.0	697.3	2.11	4.22	
6CS4PS	1	273.4	335.6	366.1	11.60	27.98	41.40
	2	531.0	563.7	608.1	1.16	3.13	
	3	640.7	677.7	698.7	1.38	3.20	
8CS2PS	1	281.8	334.4	362.0	15.36	32.20	34.09
	2	519.3	541.0	575.6	0.95	2.19	
	3	609.6	641.7	677.0	0.97	2.17	
CS	1	284.0	334.5	361.6	18.97	43.90	27.07

2.2　原料比例对热解特性的影响

图 2 为 PS,CS 及其混合物在 20 ℃/min 升温速率条件下的 TG 与 DTG 曲线。由图 2 可见,PS 的 DTG 曲线呈现 3 个明显的失重峰,其热解过程可分为 3 个阶段:第一阶段为挥发分析出阶段,峰值温度为 278.8 ℃，最大失重速率为 2.19%/min,失重量为 11.26%。PS 中的有机物主要来源于制浆造纸过程残留的纸浆、纤维,以及部分氨基酸、



(a)TG 曲线 (b)DTG 曲线

图 2 PS,CS 及其混合物的 TG 和 DTG 曲线

Fig.2 TG and DTG curves of PS,CS and mixtures

腐殖质和多环芳烃等[10],因此该阶段对应的是纤维素、半纤维素及少量木质素等低沸点半挥发性有机物的分解；第二阶段为炭化阶段，温度为546.5~610.3 ℃,峰值温度为 577.9 ℃,最大失重速率为 2.16%/min,失重量为 5.27%。该阶段主要涉及木质素、焦油、炭及高分子量碳水化合物的分解,并伴随挥发分的二次裂解[11-13];第三阶段为矿物质分解阶段,位于 655.6~713.4 ℃,峰值温度为679.5 ℃，最大失重速率为 3.27%/min，失重量为7.10%,主要为无机盐类的热分解[14]。

CS 的热解过程可分为两个阶段:第一阶段为挥发分析出阶段,发生在 180~400 ℃,是主要的失重阶段。该阶段峰值温度为 334.5 ℃,最大失重速率达 18.97%/min,失重量为 43.90%。其中,270 ℃左右的肩峰主要源于半纤维素分解，而 334 ℃处的主失重峰则对应纤维素的裂解;第二阶段为炭化阶段,温度为 400~650 ℃,此阶段小部分木质素与焦炭缓慢分解,挥发分析出逐渐减弱,表明热解反应已进入后期并趋于结束[15]。

不同比例混合物的热解规律基本一致,其 TG 与 DTG 曲线均介于 PS 和 CS 之间，整体上兼具两者的热解特征,表明混合物的热解行为是 PS与 CS 单独热解的综合体现,这与 Xie Z Q[16]对造纸污泥与稻秆共热解的研究结论相符。随着混合物中 CS 比例从 20%增至 80%，低温区失重峰逐渐右移并收敛，热解起始温度由 259.9 ℃升高至281.8 ℃,终止温度由 368.3 ℃降至362.0 ℃,失重量也从 16.62%增至 32.20%。该变化可能源于混合物中 PS 比例降低,导致来自 PS 的碱/碱土金属含量减少,从而削弱了对生物质热解的催化作用[17]。高温区的两个失重峰则逐渐向低温方向偏移,其起始温度、峰值温度、终止温度、最大失重速率及失重量均呈现不同程度下降,这可能是由于前期挥发分析出后样品孔隙结构更为发达,促进了炭及矿物质后续的分解过程[18]。

2.3 相互作用

为探究 PS 与 CS 在共热解过程中是否存在相互作用,假设混合物中 PS 与 CS 按其掺混比例独立热失重,所得数据作为理论值,并计算不同混合比例下理论值与试验值的差值 ΔW。ΔW 曲线如图 3 所示。由图 3 可知,ΔW 并不为零,表明 PS 与 CS 在共热解过程中的失重行为并非二者单独热解的简单线性叠加,而是存在一定的相互作用。

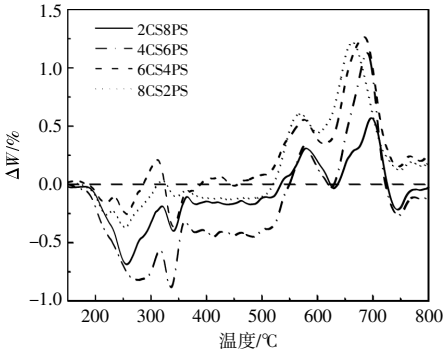


图 3 PS 与 CS 混合物的 ΔW 变化

Fig.3 ΔW Variation for the mixtures of PS and CS

TG 曲线反映样品残余质量,可表征热解反应的完成程度,残余质量越小表明反应越充分。根据式(2),ΔW 曲线中,若 $\Delta W>0$,表示理论值大于试验值,说明 PS 与 CS 的混合对共热解反应具有促进作用;若 $\Delta W<0$,则表现为抑制作用。

由图 3 可见,在 500 ℃之前,ΔW 值多数小于

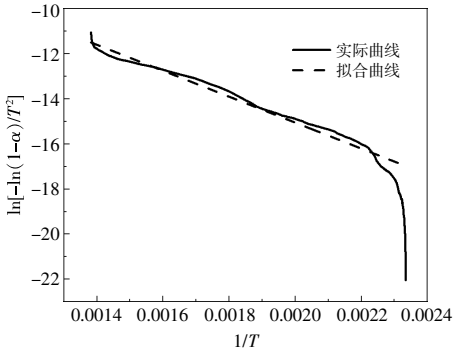
零,表明两者混合对共热解反应整体呈抑制作用。ΔW 在 260 ℃和 340 ℃附近出现负向峰值，对应混合物 DTG 曲线上第一个失重峰的位置,说明此时混合体系对 CS 中半纤维素和纤维素的热解具有较明显的抑制作用。随着 CS 掺混比例增加,该抑制作用先增强后减弱，在掺混比例为 4:6(4CS6PS)时抑制最强。

在 500~750 ℃,ΔW 曲线出现两个正向峰值,表明该温度段内 PS 与 CS 混合对共热解反应起促进作用,且在掺混比例为 6:4(6CS4PS)时促进作用最为显著。

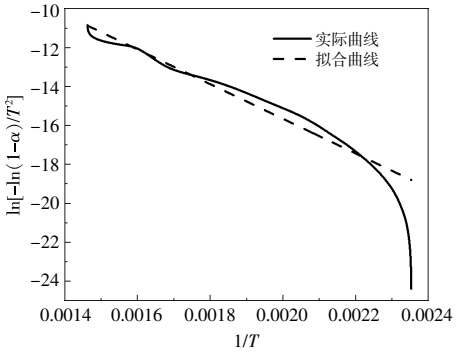
PS 具有高灰分、低挥发分的特性,其灰分附着于混合样品表面，会阻碍 CS 热解释放的挥发分析出,从而抑制热解反应进行[19]。在较低温度下,PS 中灰分难以分解，且随着 CS 比例升高,挥发分含量增加,灰分对反应的抑制作用更为显著;但随着 CS 掺量继续提高，灰分相对含量逐渐降低,抑制作用相应减弱。在第二个失重阶段,挥发分已基本释放完毕,灰分中含有的部分碱/碱土金属开始发挥催化作用,且随着 CS 添加量的增加,催化效应逐渐凸显。第三个失重阶段主要为灰分中矿物质的热分解,此时半纤维素、纤维素和木质素的分解使样品内部结构疏松、孔隙发达,有利于矿物质的进一步分解。因此,在第二和第三失重阶段,混合物共热解过程表现为相互促进作用。

2.4　原料比例对热解动力学的影响

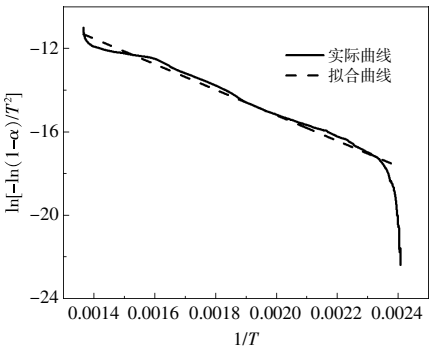
本文对混合物热解过程中最具代表性的挥发分析出阶段开展了动力学分析。图 4 给出了升温速率为 20 ℃/min 条件下不同比例混合物的拟合曲线。采用 Coats-Redfern 法计算得到 PS,CS 及



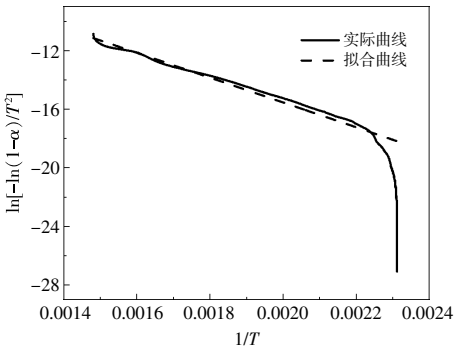
(a)PS



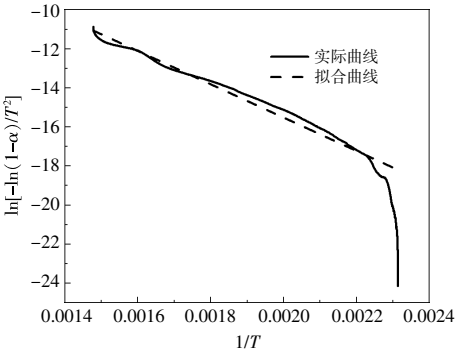
(b)CS



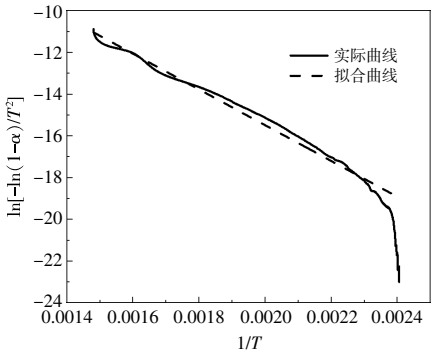
(c)2CS8PS



(d)4CS6PS



(e)6CS4PS



(f)8CS2PS

图 4 PS,CS 及其混合物热解的 $\ln[-\ln(1-\alpha)/T^2]-1/T$ 曲线

Fig.4 Plots of $\ln[-\ln(1-\alpha)/T^2]$ VS $1/T$ of PS,CS and mixtures pyrolysis

其混合物在 20 ℃/min 升温速率下的热解动力学参数,结果见表 4。由表 4 可知,所有拟合的 R^2 均大于 0.96,且拟合曲线与试验数据吻合良好,表明采用一级反应模型能够较好地描述 PS,CS 及其混合物的热解过程。

表 4 样品热解的动力学参数

Table 4 Pyrolytic kinetic parameters of samples

样品	温度 T ℃	转化率 α %	活化能 E kJ/mol	指前因子 A min^{-1}	R^2
PS	140~402	6.46~40.86	48.27	5.50×10^3	0.978 46
2CS8PS	144~406	5.18~55.79	56.66	3.29×10^4	0.981 71
4CS6PS	140~402	6.68~66.42	62.59	1.26×10^5	0.978 81
6CS4PS	141~403	5.01~74.27	65.75	2.62×10^5	0.974 46
8CS2PS	142~402	5.32~80.33	71.27	8.96×10^5	0.971 46
CS	142~402	4.83~85.55	73.24	1.39×10^6	0.967 51

在 20 ℃/min 的升温速率下,PS 单独热解的活化能为 48.27 kJ/mol,CS 单独热解的活化能为 73.24 kJ/mol,明显高于 PS。这是因为 CS 中含有较多的半纤维素、纤维素和木质素,其结构复杂、热稳定性好,热解所需能量较高,因此活化能较大[20]。而 PS 由于在制浆造纸过程中经历了生物氧化,其生物质内部结构遭到破坏,高分子有机物转化为低分子物质,在高温下更不稳定、易于分解,因而活化能较低[21]。随着混合物中 CS 比例的增加,热解活化能逐渐升高。当 CS 比例从 20%增至 40%时,活化能增幅最大,达到 5.93 kJ/mol,这与 ΔW 的变化趋势一致,表明在此混合比例下共热解的抑制作用最强,导致活化能显著增加。指前因子随 CS 添加量的增加呈现相似的增长规律。

3 结论

①PS 的起始热解温度与最大失重速率均低于 CS,而最终残余率及终止温度则高于 CS。随着 CS 掺混比例的增加,混合物的起始温度和最大失重速率显著上升,终止温度逐渐下降。升温速率提高时,混合物 6CS4PS 的起始温度、峰值温度及终止温度均相应升高,失重量略有降低。

②PS 与 CS 在低温区共热解时存在抑制作用,并在 CS 占比为 40%时抑制作用最强;在高温区则表现为促进作用,且在 CS 占比为 60%时促进作用最为显著。PS 中高含量的灰分阻碍了 CS 热解挥发分的析出,从而抑制了第一阶段的热解反应。在高温区域,灰分所含的碱/碱土金属发挥催化作用,促进了共热解反应的进行。

③对 PS,CS 及其混合物的热解过程进行动力学分析表明,其反应机理可用一级反应模型描述。PS 热解的活化能低于 CS,这主要由于 PS 在制浆造纸过程中经历了生物氧化,破坏了原有生物质的内部结构。混合物的活化能介于两者之间,且随 CS 掺混比例从 20%增至 80%,活化能由 56.66 kJ/mol 升高至 71.27 kJ/mol。

参考文献:

[1] 张宝峰,王震,康军,等.污泥沉降比自动检测系统在污水处理中的应用[J].传感器与微系统,2025,44(3):165-168.

[2] Syed-Hassan S S A,Wang Y,Hu S,et al. Thermochemical processing of sewage sludge to energy and fuel: Fundamentals,challenges and considerations [J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2017,80:888-913.

[3] 郭康鹰,高宝玉,岳钦艳.造纸污泥的资源化综合利用研究现状与展望[J].土木与环境工程学报(中英文),2021,43(4):118-131.

[4] Frišták V,Bošanská D,Turčan V,et al.Relevance of pyrolysis products derived from sewage sludge for soil applications[J].Agriculture,2022,13(1):89.

[5] Lou R,Wu S B,Lv G J,et al.Energy and resource utilization of deinking sludge pyrolysis [J].Applied Energy,2012,90(1):46-50.

[6] Fonts I,Azuara M,Gea G,et al.Study of the pyrolysis liquids obtained from different sewage sludge[J].Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,2009,85 (1-2):184-191.

[7] Wang C X,Bi H B,Lin Q Z,et al.Co-pyrolysis of sewage sludge and rice husk by TG-FTIR-MS:

Pyrolysis behavior,kinetics,and condensable/non – condensable gases characteristics[J].Renewable Energy, 2020,160:1048–1066.

[8] Wang X B,Deng S H,Tan H Z,et al.Synergetic effect of sewage sludge and biomass co–pyrolysis: A combined study in thermogravimetric analyzer and a fixed bed reactor[J]. Energy Conversion and Management,2016, 118:399–405.

[9] Çepelioğullar Ö,Pütün A E.Thermal and kinetic behaviors of biomass and plastic wastes in co–pyrolysis[J]. Energy Conversion and Management,2013,75:263–270.

[10] 刘敬勇,傅杰文,孙水裕,等.不同来源污泥混燃特性及其综合燃烧性能评价 [J]. 环境科学学报,2016,36(3):940–952.

[11] Rajendra I M,Winaya I N S,Ghurri A,et al.Pyrolysis study of coconut leaf's biomass using thermogravimetric analysis [J].IOP Conference Series:Materials Science and Engineering,2019,539(1):012017.

[12] Yao C,Tian H,Hu Z M,et al.Characteristics and kinetics analyses of different genus biomass pyrolysis[J]. Korean Journal of Chemical Engineering,2018,35(2): 511–517.

[13] 邹辰辰.三种生物质热解特性及动力学研究分析[J].工业加热,2022,51(8):9–13.

[14] Dai Q J,Xiang W,Liu Q,et al.Co–pyrolysis biochar derived from sewage sludge and lignin: Synergetic effect and adsorption properties [J].Journal of Environmental Chemical Engineering,2022,10(3):107898.

[15] 张东红,林晓娜,任夏瑾,等.钙对生物质/塑料混合物共热解特性及动力学的影响[J].可再生能源,2021, 39(4):442–448.

[16] Xie Z Q,Ma X Q.The thermal behaviour of the co–combustion between paper sludge and rice straw [J]. Bioresource Technology,2013,146:611–618.

[17] 王锐,高明洋,曹景沛.碱/碱土金属催化松木屑快速热解机制[J].应用化学,2022,39(2):289–297.

[18] 刘凯传,刘佳欢,孙甲玉,等.污泥–秸秆混合基生物炭对土壤性质和植物生长的影响[J].山东农业大学学报(自然科学版),2018,49(6):1015–1019.

[19] 方诗雯,丁力行,陈姝,等.造纸污泥与煤/生物质掺混燃烧特性及动力学分析[J].仲恺农业工程学院学报, 2021,34(1):41–47.

[20] 陈东雨,黄顺朝,刘新月,等.盐酸预处理对生物质热解特性和热力学特性的影响[J].农业机械学报,2020, 51(8):320–327.

[21] 刘敬勇,陈佳聪,孙水裕,等.城市污水污泥与咖啡渣的混燃特性分析 [J]. 环境科学学报,2016,36(10): 3784–3794.

The co-pyrolysis characteristics and kinetics of paper sludge and corn straw

Guo Yadong, Lin Xiaona, Chen Xiaoyun, Tang Binbin, Fu Peng
(College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: In order to investigate the co-pyrolysis characteristics of paper sludge and corn straw, thermogravimetric analysis (TGA) was used to study the pyrolysis process of paper sludge, corn straw and mixtures at different heating rates (10, 15, 20 and 25 ℃/min). The Coats Redfern method was used to analyze the pyrolysis kinetics. The results indicated that there were great differences in pyrolysis characteristics between paper sludge and corn straw. Compared to corn straw, the residue yield of paper sludge at 800 ℃ was 36.59% higher. Whereas the difference of activation energy and the maximum weight loss rate between paper sludge and corn straw were 24.97 kJ/mol and 16.78%/min, respectively. As the mass ratio of corn straw increased from 20% to 80%, the initial co-pyrolysis temperature of the mixtures increased from 259.9 ℃ to 281.8 ℃, the maximum weight loss rate increased from 5.29%/min to 15.36%/min, the residue yield decreased from 56.25% to 34.09%, and the activation energy increased from 56.66 kJ/mol to 71.27 kJ/mol. By comparing the theoretical and experimental values, it was concluded that there was an interaction between paper sludge and corn straw during co-pyrolysis, which inhibited the pyrolysis process in the low temperature region and promoted the decomposition process in the high temperature region. The interaction was significantly existed when the mass ratio of corn straw was 60%. The findings can provide basic support for the utilization of paper sludge and corn straw.

Keywords: paper sludge; corn straw; co-pyrolysis; kinetics; interaction