

# 棉秆催化热解差异研究及预测

万乡缘\*, 郑焯予

重庆理工大学理学院, 重庆

收稿日期: 2024年12月18日; 录用日期: 2025年2月17日; 发布日期: 2025年2月25日

## 摘要

本文旨在探究脱硫灰为催化剂下, 棉秆、纤维素和木质素热解过程中不同混合比例与热解产物间的关系, 为棉秆的高效利用和可持续发展提供部分理论支持。本文通过t检验, 发现脱硫灰对棉秆中纤维素和木质素生成的热解产物均有不同促进。同时使用配对样本T检验对脱硫灰与纤维素和木质素两种组合得到的热解产物与热解气进行差异性分析。发现在相同混合比例下, 纤维素与木质素的热解产物和热解气大多数都具有显著性差异。通过建立多项式回归拟合, 用于研究混合比例对脱硫灰/纤维素热解的影响, 模型系数表明混合比例对热解产物产率及热解气体产量有较大影响。此外, 本文还采用灰色预测对不同混合比例下脱硫灰/棉秆的热解产物的产率进行了预测。

## 关键词

脱硫灰, 棉秆, T检验, 灰色预测

# Research and Prediction of Catalytic Pyrolysis Difference of Cotton Stalk

Xiangyuan Wan\*, Zhuoyu Zheng

School of Science, Chongqing University of Technology, Chongqing

Received: Dec. 18<sup>th</sup>, 2024; accepted: Feb. 17<sup>th</sup>, 2025; published: Feb. 25<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

The purpose of this paper is to explore the relationship between different mixing ratios and pyrolysis products in the pyrolysis process of cotton stalk, cellulose and lignin with desulfurized fly ash as catalyst, and to provide some theoretical support for the efficient utilization and sustainable development of cotton stalk. In this paper, through t test, it was found that the desulfurized fly ash had different promotion effects on the pyrolysis products of cellulose and lignin in cotton stalk. At the

\*通讯作者。

文章引用: 万乡缘, 郑焯予. 棉秆催化热解差异研究及预测[J]. 运筹与模糊学, 2025, 15(1): 516-526.

DOI: 10.12677/orf.2025.151047

same time, the paired sample T test was used to analyze the difference between the pyrolysis products and pyrolysis gas obtained by the combination of desulfurized fly ash and cellulose and lignin. It was found that most of the pyrolysis products and pyrolysis gases of cellulose and lignin had significant differences at the same mixing ratio. By establishing polynomial regression fitting, the influence of mixing ratio on the pyrolysis of desulfurization DFA/CE was studied. The model coefficients showed that the mixing ratio had a great influence on the yield of pyrolysis products and the yield of pyrolysis gas. In addition, the yield of pyrolysis products of desulfurization DFA/CS stalk under different mixing ratios was predicted by grey prediction.

## Keywords

Desulfurized Fly Ash, Cotton Stalk, T Test, Grey Prediction

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国作为一个农业大国, 其残余物质量巨大。秸秆是一种常见的农业残余物, 据资料显示, 2021 年我国秸秆产量高达 8.65 亿 t。棉秆是棉花生产的主要副产物, 其含有丰富的木质素, 纤维素和半纤维素以及粗蛋白等物质, 是一种重要的可再生物质能源[1], 主要用于制浆造纸、化工产品原材料等方面。近年来, 多数学者对棉秆资源的开发和利用进行了研究。

目前直接燃烧是生物质被应用的最简单方式, 但这种方式能源利用效率低且污染环境, 极大地影响了生物质能源的工业应用[2]。热解是一个把生物质转化为有用燃料的基本热化学过程。而生物质催化热解是指在隔绝空气条件下, 利用催化剂促进热解。催化热解与传统方法相比较, 具有降低热解温度、提高清洁能源产率、有望得到定向化工物质的优点[3]。通常棉秆热解产物的质量和产率受到热解温度、催化剂等因素影响, 而目前有关催化剂对生物质热解过程的影响机制方面的研究较少, 因此分析催化剂对生物质热解过程的影响显得十分必要[4]。

脱硫灰是一种工业固体废弃物, 具有粒度细、密度低等特点。大量的脱硫灰被直接填埋或露天堆放对我国造成了严重的环境污染。有研究发现, 钙系催化剂能够明显提高生物质热解过程中气相产物的产率和品质, 故研究脱硫灰对棉秆热解产物生成的催化机理和影响。并且由于棉秆中富含纤维素和木质素, 考虑将其作为棉秆中模型化合物, 进一步研究脱硫灰对棉秆热解过程中不同组分生成的定向催化作用, 对于棉秆的高效利用和可持续发展具有重要意义[5]。

## 2. 预备知识

### 2.1. Pearson 相关系数

Pearson 相关系数是衡量两个变量之间线性相关程度的指标, 其取值范围在-1 到 1 之间, 绝对值越大相关性越强, -1 为完全负相关, 1 为完全正相关, 0 表示不相关。

$$\rho_{XY} = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - E(X))(Y_i - E(Y))}{n \sigma_X \sigma_Y} \quad (1)$$

## 2.2. 单样本 t 检验

单样本 t 检验可以对数据进行显著性分析, 假设形式为:

$$H_0: \mu \geq \mu_0 \quad \text{vs} \quad H_1: \mu < \mu_0,$$

其中  $\mu$  为总体均值,  $\mu_0$  为检验均值。即认为总体均值  $\mu$  与检验均值  $\mu_0$  之间是否无显著性差异。该检验构造的 t 统计量为:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}}, \tag{2}$$

其中 t 统计量服从自由度为  $n-1$  的 T 分布, S 为样本标准差。

## 2.3. 配对样本 T 检验

配对样本 T 检验用于检验两组相关样本是否来自相同均值的正态总体, 即推断两个总体的均值是否存在显著差异。其原假设为  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$ 。其中,  $\mu_1$  和  $\mu_2$  分别为第一个总体和第二个总体的均值。

配对的概念是指两组样本的各样本值之间存在着对应关系, 配对样本的两组样本值之间的配对是一一对应的, 并且两组样本的容量相同。

在配对样本 T 检验中, 设  $x_{1i}, x_{2i} (i=1, \dots, n)$  分别为配对样本。其样本差值  $d_i = x_{1i} - x_{2i}$ , 此时检验统计量

$$t = \frac{\bar{d} - (\mu_1 - \mu_2)}{S/\sqrt{n}}, \tag{3}$$

式中,  $\bar{d}$  为  $d_i$  的均值; S 为  $d_i$  的标准差; n 为样本数。当  $\mu_1 - \mu_2 = 0$  时, t 统计量服从自由度为  $n-1$  的 T 分布。

## 2.4. 灰色预测

灰色预测是一种适用于小样本数据的预测模型, 它可以通过少量的不完全信息, 建立数学模型并进行预测, 在短期预测和趋势分析方面有着广泛的应用。灰色预测主要是以灰色系统里的随机变量为基数, 再加入一组数生成有规律的序列以建立数学模型, 得到预测值[6]。构建灰色预测模型步骤如下:

首先需要确定原始数据序列:

$$X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}, \tag{4}$$

进行累加得到新序列

$$X^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\}, \quad x^{(1)}(n) = x^{(0)}(1) + \dots + x^{(0)}(n).$$

进而有灰色微分方程为:

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b, \quad z^{(1)}(k) = [x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)]/2, k = 2, 3, \dots, n.$$

得到白化微分方程:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b. \tag{5}$$

其中 a 和 b 均为待估参数。a 叫做发展系数, 用于判断数据累积序列的增长或下降速度, b 为灰色作用量, 代表除了增长趋势之外可能影响数据变化的其他因素。

对上述微分方程积分, 得到

$$x^{(t)}(t) = \left( x^{(t)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-at} + \frac{b}{a}, t = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

### 3. 模型

本研究将脱硫灰作为催化剂, 由于棉秆中含有丰富的纤维素和木质素, 故选用低温条件下的棉秆催化热解实验数据, 数据中包含棉秆、纤维素、木质素, 以脱硫灰为催化剂得到不同混合比例下的热解产物和热解气产率, 以此探讨脱硫灰对这三者热解的影响。

#### 3.1. 描述性分析

脱硫灰/棉秆(DFA/CS)热解可生成焦油(Tar)、水(Water)、焦炭渣(Char)以及合成气(Syngas) 4 种热解产物。绘制脱硫灰与棉秆在不同混合比例下, 热解产物的变化图以及对应的变化率, 进一步分析 4 种热解产物的产率与相应热解组合的混合比例的关系。

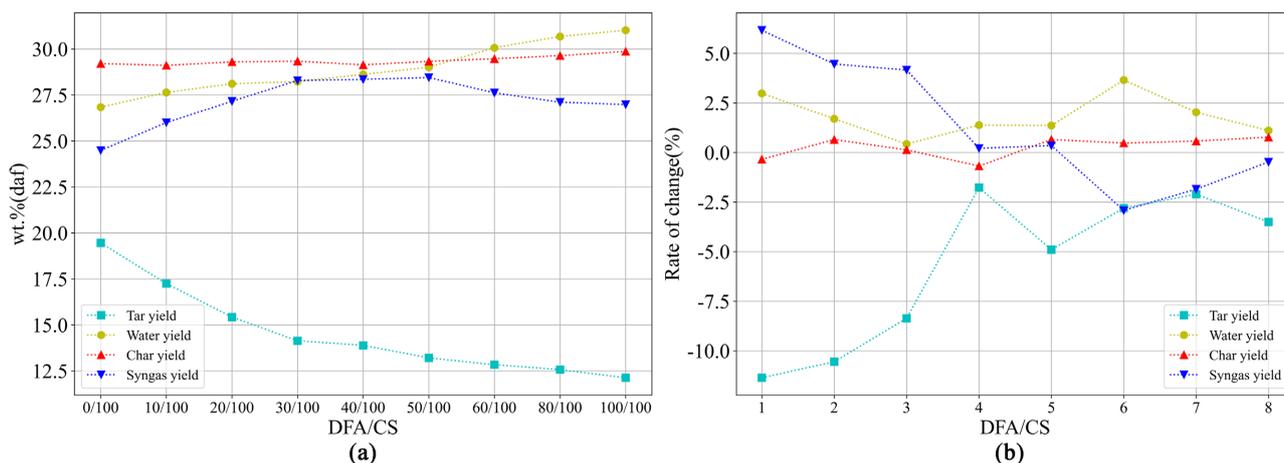


Figure 1. Trend and rate-of-change plots of DFA/CS pyrolysis product yields  
图 1. DFA/CS 热解产物产率的趋势图及变化率图

根据图 1, 可以初步得到脱硫灰明显降低了棉秆热解焦油的产率; 当脱硫灰/棉秆混合比为 100/100 时, 焦油产率达到最低, 为 12.13%, 且在混合比为 30/100 时, 降速达到最大值, 为-1.768%; 脱硫灰对热解水的产量有明显促进作用, 随着脱硫灰比例的增加, 产水率持续升高, 最终占比达到了 31.02%, 为 4 种产物中占比最大; 随着混合比的增大, 焦炭渣产率总体上呈现缓慢增大的趋势, 且增速变化较小, 在混合比为 40/100 时, 出现小幅度的下降, 随后产率持续上升; 合成气产率在混合比增大的条件下, 先升高后又缓慢降低, 变化率的趋势波动较大。综上可知, 根据脱硫灰/棉秆的热解产物产率的趋势图及变化率图, 初步判断在脱硫灰/棉秆热解过程中, 脱硫灰明显促进了棉秆的热分解, 以及水和焦炭渣的生成, 在一定混合比范围内, 脱硫灰提高了合成气的产率。

#### 3.2. 相关性分析

首先对脱硫灰(DFA)与棉秆(CS)、纤维素(CE)和木质素(LG)这三种热解组合在不用混合下得到的热解产物的数据进行 Pearson 相关性分析。

分别对这三组热解组合的不同混合比与 4 种热解产物作 Pearson 相关性分析, 得到相关性系数表, 绘

制成表格见表 1。

**Table 1.** The correlation coefficient between the three pyrolysis combinations and the pyrolysis products  
**表 1.** 三种热解组合与热解产物相关系数表

	DFA/CS	DFA/CE	DFA/LG
焦油产率	-0.883	0.759	-0.794
产水量	0.984	-0.604	0.866
焦炭渣产率	0.898	0.367	-0.394
合成气产率	0.416	-0.790	0.428

从表 1 可以看出, 在脱硫灰/棉秆这一热解组合下, 不同混合比与焦油产率成负相关, 与产水量, 焦炭渣产率和合成气产率成正相关; 在脱硫灰/纤维素这一热解组合下, 不同混合比与焦油产率和焦炭渣产率成正相关, 与产水量和合成气产率成负相关; 在脱硫灰/木质素这一热解组合下, 不同混合比与焦油产率和焦炭渣产率成负相关, 与产水量和合成气产率成负相关。初步发现随着脱硫灰的比例增加, 与纤维素的热解反应促进水和焦炭渣的生成, 与木质素的热解反应促进水和合成气的生成。

### 3.3. 显著性分析

为了进一步确定脱硫灰这一催化剂是否对棉秆, 纤维素和木质素热解生成的 4 种产物有显著的促进作用。本文采用单样本 t 检验对数据进行显著性分析, 三种热解组合的检验结果见表 2。

**Table 2.** T-test results of three pyrolysis combinations  
**表 2.** 三种热解组合 t 检验结果表

热解产物	DFA/CS		DFA/CE		DFA/LG	
	统计量	P 值	统计量	P 值	统计量	P 值
焦油产率	-6.0637	0.9998	5.7581	0.0003	-5.9624	0.9997
产水量	4.3948	0.0012	-6.1388	0.9998	5.7207	0.0004
焦炭渣产率	2.0563	0.0369	6.5313	0.0002	-6.3246	0.9998
合成气产率	6.2674	0.0001	-4.7631	0.9990	6.0303	0.0003

表 2 说明脱硫灰作为催化剂与棉秆进行热解反应时, 只有焦油产率的统计量为-6.0637, P 值明显大于显著性水平 0.05, 即接受原假设, 这表示脱硫灰对焦油产率无显著作用, 对其他 3 种热解产物有显著作用; 在脱硫灰/纤维素这一组合中, 产水量和合成气产率的检验统计量分别为 0.9998 和 0.9990, P 值均大于 0.05, 接受原假设, 说明对于产水量和合成气产率无显著作用, 而焦油产率和焦炭渣产率的 P 值小于 0.05, 拒绝原假设, 即存在显著性差异; 在脱硫灰/木质素这一热解组合中, 与脱硫灰/纤维素这一热解组合的结果恰巧相反。这说明脱硫灰在与纤维素热解时, 对焦油产率和焦炭渣产率有着显著作用; 在与木质素热解时, 对产水量和合成气产率有着显著作用。

通过描述性分析与显著性分析, 最终得到三种热解组合生成 4 种热解产物的显著效果见表 3。

### 3.4. 差异性分析

本文数据中脱硫灰和纤维素、木质素热解共采用 8 种混合比例, 分别是 10/100, 20/100, 30/100, 40/100, 50/100, 60/100, 80/100, 100/100。对 8 种混合比例下纤维素和木质素热解产物的产率数据进行

配对样本 T 检验。得到的检验结果见表 4。

**Table 3.** The significant results of the three pyrolysis combinations  
**表 3.** 三种热解组合的显著结果表

	DFA/CS	DFA/CE	DFA/LG
焦油产率	-	显著促进	-
产水量	显著促进	-	显著促进
成炭率	显著促进	显著促进	-
合成气产率	显著促进	-	显著促进

**Table 4.** Paired-sample t-test results for CE and LG pyrolysis products  
**表 4.** CE 和 LG 热解产物配对样本 T 检验结果

热解产物	平均值 ± 标准差		配对差值	t	df	P 值
	DFA/CE	DFA/LG				
焦油	42.082 ± 3.764	11.3 ± 3.207	30.782 ± 0.557	12.52	7	0.000
水	19.262 ± 3.759	20.435 ± 2.539	-1.173 ± 1.22	-0.538	7	0.607
焦炭渣	24.065 ± 1.141	57.336 ± 0.373	-33.271 ± 0.768	-64.763	7	0.000
合成气	14.59 ± 1.271	10.929 ± 1.153	3.661 ± 0.118	4.621	7	0.002

根据得到的检验结果, 分别分析其是否存在差异性。

由表 4 可知, 在显著性水平为 0.05 时, 由于概率 P 值小于 0.05, 故拒绝原假设, 即认为  $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$ , 故可认为在相同脱硫灰比例的催化作用下, 纤维素和木质素热解产物中焦油产率存在显著差异。同理可得, 纤维素和木质素热解产物产水量不存在显著差异, 焦炭渣产率和合成气产率存在显著差异。

由于脱硫灰和纤维素、木质素热解还可生成气体  $H_2$ 、 $CO$ 、 $CO_2$ 、 $CH_4$  和  $C_2H_6$ , 因此还考虑纤维素和木质素热解气体的差异性。本文选用 5 种混合比例, 分别是 20/100, 40/100, 50/100, 80/100, 100/100。对 5 种混合比例下纤维素和木质素热解气体各组分的产量数据进行配对样本 T 检验。得到的检验结果见表 5。

**Table 5.** Paired-sample t-test results for the yield of CE and LG pyrolysis gases  
**表 5.** CE 和 LG 热解气体各组分产量配对样本 T 检验结果

热解产物	平均值 ± 标准差		配对差值	t	df	P 值
	DFA/CE	DFA/LG				
$H_2$	50.74 ± 14.942	0.754 ± 0.058	49.986 ± 14.884	7.509	4	0.002
$CO$	8.84 ± 3.364	17.661 ± 2.365	-8.821 ± 0.999	-3.497	4	0.025
$CO_2$	7.92 ± 6.73	37.262 ± 7.526	-29.342 ± 0.796	-4.629	4	0.010
$CH_4$	1.68 ± 0.95	30.982 ± 2.557	-29.302 ± 1.607	-21.177	4	0.000
$C_2H_6$	6.68 ± 4.54	0.07 ± 0.016	6.61 ± 4.524	3.259	4	0.031

根据检验结果作出如下分析:

由表 5 可知, 在显著性水平为 0.05 时, 由于概率 P 值为 0.002, 小于 0.05, 故拒绝原假设, 即认为

$\mu_1 - \mu_2 \neq 0$ , 可认为在相同脱硫灰分比例的催化作用下, 纤维素和木质素热解气体中  $H_2$  产量存在显著差异。同理可得, 纤维素和木质素热解气体中  $CO$ 、 $CO_2$ 、 $CH_4$ 、 $C_2H_6$  产量均存在显著差异。

结果显示, 在相同脱硫灰分比例的催化作用下, 纤维素和木质素热解产物焦油产率、焦炭渣产率、合成气产率存在显著差异, 而热解产物产水量不存在显著差异, 热解气体各组分的产量存在显著差异。

究其原因, 可能是纤维素和木质素本身结构差异造成了热解产物和气体差异。木质素富含甲氧基侧链, 甲氧基侧链断裂可产生  $CH_4$ , 故脱硫灰/木质素可产生大量  $CH_4$ 。而在低温( $<600^\circ C$ )热解条件下, 木质素中的芳环结构难以被破坏, 故木质素的热分解很难生成  $C_2H_6$ , 纤维素的单元结构开环后进一步裂解可生成  $C_2H_6$ 。有研究发现, 在棉秆热解过程中, 纤维素和木质素成分存在交互作用, 抑制了异裂生成  $C_2H_6$  的自由基反应[7]。这也进一步说明纤维素和木质素热解存在明显差异。

#### 4. 多项式回归

为进一步考虑混合比例对脱硫灰催化纤维素和木质素热解的影响, 本文将实验数据与得到的模型方程相结合, 利用数学方法例如最小二乘法用于估计模型参数。此后, 可绘制拟合曲线和真实值对比图, 计算出拟合残差及决定系数用于评估模型优劣。

绘制脱硫灰/纤维素热解产物产率与混合比例散点图见图 2。

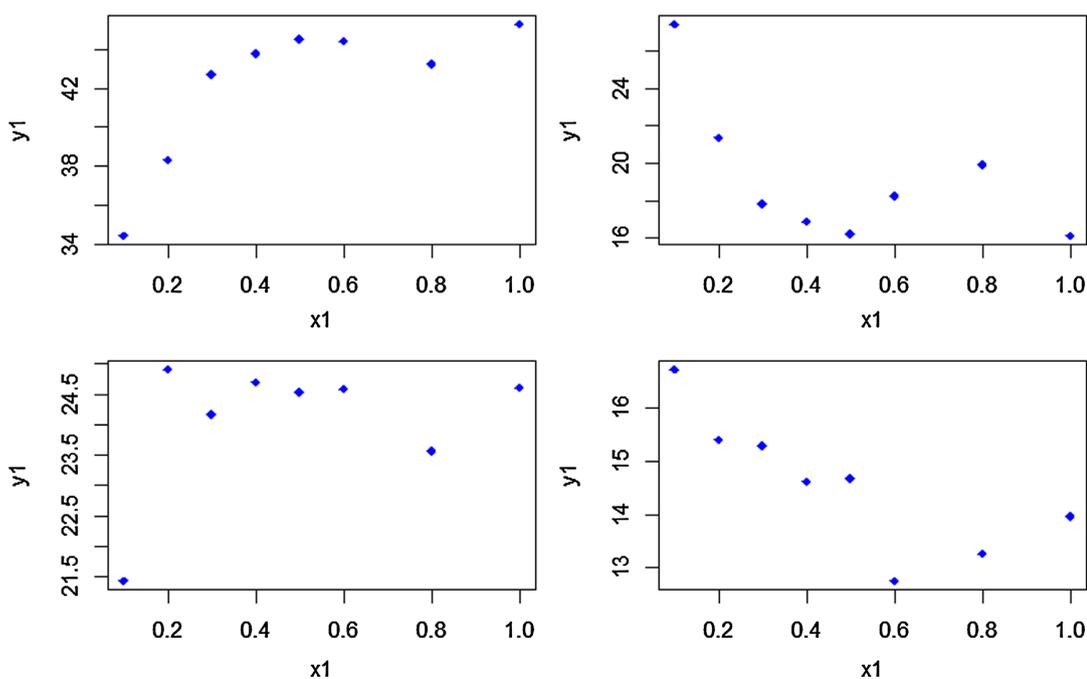
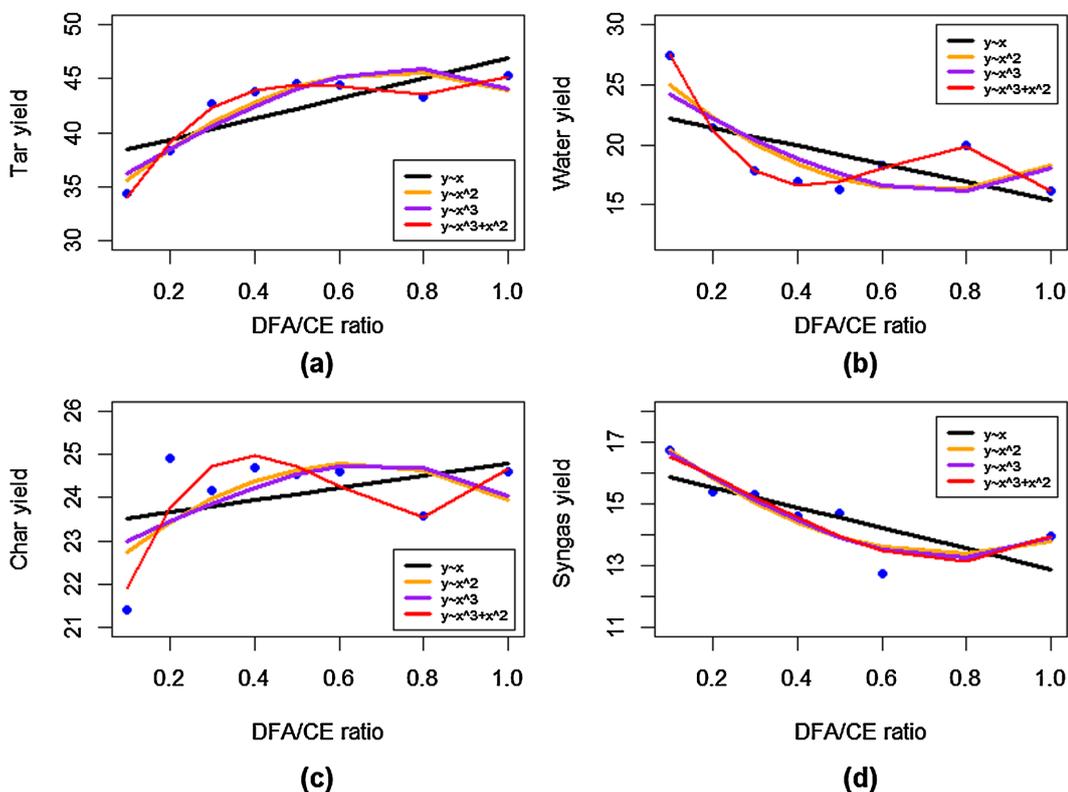


Figure 2. Scatter plot of DFA/CE pyrolysis product yield versus mixing ratio

图 2. DFA/CE 热解产物产率与混合比例散点图

通过图 2 发现, 脱硫灰/纤维素热解产物产率与混合比例无明显的线性关系, 因此考虑建立多项式回归模型, 通过多项式回归, 我们可以将  $n$  阶模型拟合到数据上, 并尝试对非线性关系进行建模, 本文尝试了 2 阶和 3 阶。

可分别绘制出脱硫灰/纤维素、脱硫灰/木质素的不同热解产物多项式回归拟合图, 同时可计算出各种类型函数拟合模型的拟合优度, 拟合优度越大, 表明模型拟合效果越好。本文仅绘制出脱硫灰/纤维素热解产物多项式回归拟合图见图 3。



**Figure 3.** Polynomial regression fitting of DFA/CE pyrolysis products  
**图 3.** DFA/CE 热解产物多项式回归拟合

由图 3 可看出, 分别应用了四种类型的函数进行拟合, 而(a)、(b)、(c)都显示二次项和三次项结合得到的曲线拟合效果最好, (d)显示三种函数拟合效果相近。结合各拟合模型的拟合优度, 最终得到每种热解产物产率或气体产量的最优模型。其模型方程形式如下:

$$y_{A\_B} = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2x^2 + \beta_3x^3, \tag{7}$$

$y_{A\_B}$  中的 A 表示模型化合物, 即纤维素或木质素, B 表示得到的热解产物,  $x$  表示脱硫灰与该模型化合物的混合比例。例如  $y_{CE\_T}$  表示脱硫灰/纤维素热解得到的焦油产率,  $x$  表示脱硫灰/纤维素的混合比。而  $\beta_0$  表示截距项系数,  $\beta_1$  表示一次项系数,  $\beta_2$  表示二次项系数,  $\beta_3$  表示三次项系数。

重复上述建立模型步骤, 最终得到 9 个模型。将各模型系数和拟合优度绘制成表 6。

此处仅展示部分脱硫灰/纤维素热解产物的最优模型:

$$y_{CE\_T} = 26.635 + 87.414x - 138.746x^2 + 69.878x^3, \tag{8}$$

$$y_{CE\_W} = 37.5194 - 120.3133x + 217.4867x^2 - 118.4969x^3, \tag{9}$$

$$y_{CE\_C} = 18.859 + 36.95x - 69.679x^2 + 38.517x^3, \tag{10}$$

$$y_{CE\_S} = 17.7945 - 11.4355x + 7.4362x^2, \tag{11}$$

其余模型方程可根据系数按照上述方式依次写出。

由表 6 可知, 所有模型的拟合优度均大于 0.5, 多数模型拟合优度达到了 0.9 以上, 说明这些模型拟合效果较好, 且结合模型拟合图来看, 绝大多数真实值点落在拟合曲线上, 极少数点分散在拟合曲线两

侧, 也说明拟合效果较好。在热解产物产率的模型中, 模型方程多为二项式和三项式的结合。而热解气体产量模型中, 多数模型仅选择了二项式或三项式。表中多数系数都比较大, 说明脱硫灰/纤维素混合比例对热解产物产率及热解气体产量有较大影响。

模型结果展示了脱硫灰/纤维素混合比例与热解产物产率及热解气体产量间的关系, 通过系数, 可以清晰看出比例变化对热解产物产率的影响。基于本文所用方法, 也可应用于脱硫灰/木质素探讨其影响[8]。

**Table 6.** Summary of coefficients and goodness of fit of each model  
**表 6.** 各模型系数及拟合优度汇总表

热解产物	系数				拟合优度 R <sup>2</sup>
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	
CE_T	26.63	87.41	-138.75	69.88	0.9884
CE_W	37.52	-120.31	217.49	-118.50	0.9934
CE_C	18.86	36.95	-69.68	38.52	0.7784
CE_S	17.79	-11.44	7.44	0	0.8570
CE_H <sub>2</sub>	2.96	121.97	0	-67.18	0.9997
CE_CO	18.19	-24.91	12.19	0	0.9809
CE_CO <sub>2</sub>	29.86	-64.96	37.65	0	0.9852
CE_CH <sub>4</sub>	6.52	-22.31	32.23	-15.73	0.9857
CE_C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	22.12	-47.26	28.64	0	0.9652

### 5. 灰色预测

利用级比检验对棉秆的四种热解产物比例序列进行检验[9], 其棉秆的四种产物的级比检验结果都位于(0.801,1.249)中, 说明这四个序列适合构建灰色预测模型。因此, 建立四种热解产物的灰色预测模型。得到各预测模型的发展系数、灰色作用量与后验差比 C 值见表 7:

**Table 7.** CS gray prediction test table  
**表 7.** CS 灰色预测检验表

产物	发展系数 a	灰色作用量 b	后验差比 C 值
焦油产率	0.048	17.711	0.038
产水量	-0.017	26.722	0.027
焦炭渣产率	-0.003	28.949	0.224
合成气产率	-0.002	27.228	0.376

从上表分析可以得到, 棉秆的四种灰色预测模型的后验差比值分别为 0.038、0.027、0.224 与 0.376。其中, 棉秆的焦油产率、产水量和焦炭渣产率的后验差比 C 值都小于 0.35, 而合成气产率的后验差比 C 值大于 0.35, 小于 0.65, 说明前三个产物的灰色预测模型的拟合效果良好, 但合成气产率的拟合效果一般。为进一步分析这四种模型的模型精度, 绘制模型的预测效果图如图 4。

得到的预测精度表见表 8。

从拟合图中可以看出, 四种灰色预测能很好的拟合热解产物产率的变化趋势, 同时四种预测模型的平均相对误差都保持在 10% 以下, 说明基于灰色预测的棉秆热解产物产率预测模型的预测效果良好, 可

应用于其余混合比中脱硫灰/棉秆的热解产物产率预测。

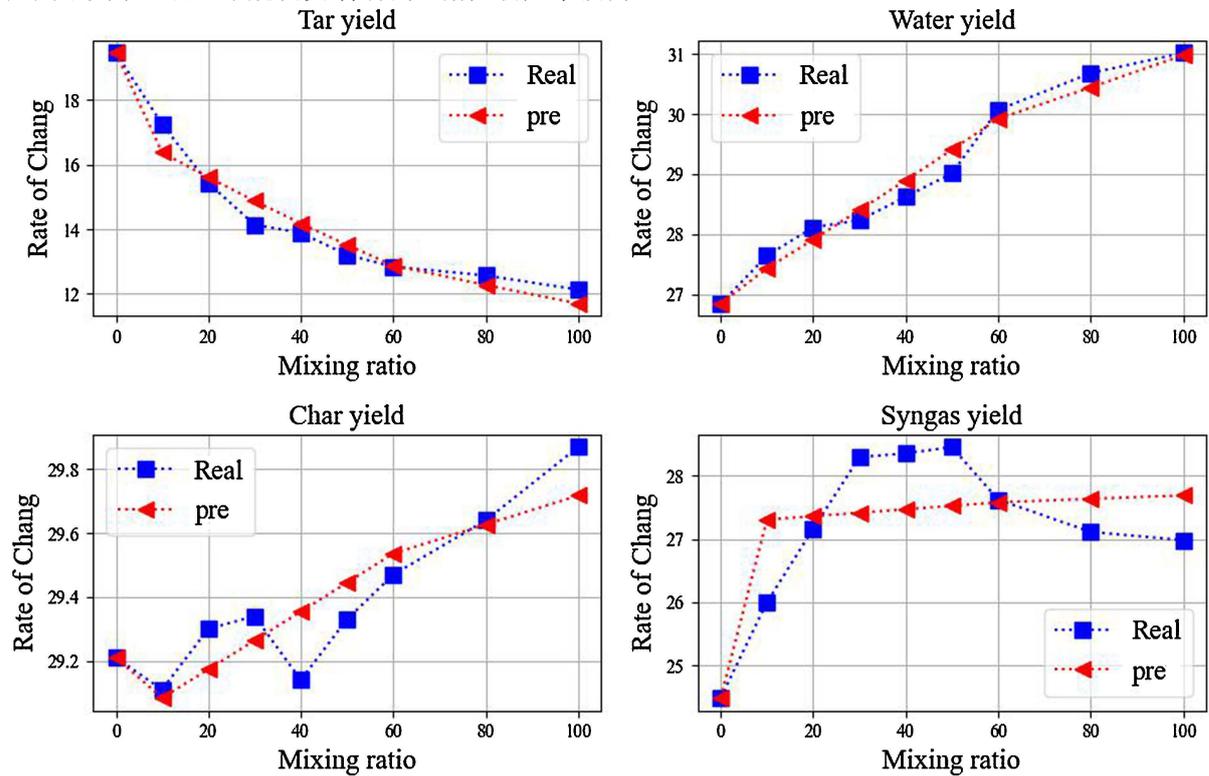


Figure 4. CS pyrolysis product gray prediction fitting plot

图 4. CS 热解产物灰色预测拟合图

Table 8. Gray prediction accuracy table for CS pyrolysis products

表 8. CS 热解产物灰色预测精度表

混合比	焦油产率	产水量	焦炭渣产率	合成气产率
10	5.049	0.772	0.091	5.015
20	1.169	0.719	0.432	0.73
30	5.217	0.594	0.261	3.101
40	2.084	0.964	0.734	3.113
50	2.301	1.355	0.391	3.262
60	0.309	0.502	0.223	0.156
80	2.345	0.77	0.044	1.925
100	3.553	0.135	0.508	2.62
均值	2.753375	0.726375	0.3355	2.49025

## 6. 结论

本文利用脱硫灰作为催化剂, 在脱硫灰与生物质的不同混合比下对棉秆、纤维素和木质素进行热解反应后得到的热解产物与热解气体进行分析, 得到如下结论。

脱硫灰能够促进棉秆的热分解, 降低焦油的产率, 也说明在热解过程中, 一部分焦油可能会转化为水、焦炭渣和合成气。当脱硫灰与棉秆的混合比为 0/100~50/100 时, 脱硫灰能够提高热解气的产率, 且

热解气中的  $H_2$  和  $CH_4$  的产量明显增加, 同时  $CO$  和  $CO_2$  产量明显降低。脱硫灰显著促进热解产物水、焦炭渣和合成气的生成; 对热解气中各组分的生成有着明显的定向催化效果。脱硫灰能够显著促进纤维素生成焦油和焦炭渣, 显著促进木质素生成水和合成气。

脱硫灰明显地促进了棉秆中纤维素热解生成  $H_2$ , 木质素的甲氧基侧链断裂形成  $CH_4$ 。脱硫灰作为催化剂在一定程度上抑制了纤维素生成  $CO$  和  $CO_2$  的反应, 也促进木质素生成  $CO$  和  $CO_2$  的生成。

脱硫灰与纤维素和木质素在相同催化剂比例的作用下, 纤维素与木质素的 4 种热解产物除了水以外, 其他 3 种热解产物(焦油、焦炭渣、合成气)都存在显著性差异; 而对于 5 种热解气, 即  $H_2$ 、 $CO$ 、 $CO_2$ 、 $CH_4$  和  $C_2H_6$  都具有显著性差异。这可能是因为纤维素与木质素的化学结构本身存在着差异, 故热解产物与热解气体也存在一定差异性。且棉秆在热解过程中, 纤维素和木质素存在着交互作用, 抑制了异裂生成  $C_2H_6$  的自由基反应, 进一步说明纤维素与木质素的热解存在明显差异。

通过多项式回归模型, 可了解混合比例对于生物质热解的影响。通过预测模型, 可以得到催化剂与生物质的不同混合比下热解产物的产率与产量, 在实际应用中针对目标产物的需求选择生物质的混合浓度[10] [11], 一定程度下对资源的利用最大化。

## 参考文献

- [1] 白志刚, 刘帅, 胡启星, 等. 棉花秸秆利用的主要途径及存在的问题[J]. 棉花科学, 2021, 43(5): 11-15.
- [2] 刘郁珏, 张涵斌, 张歆然. 秸秆热解·燃烧特性及动力学研究[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(4): 12-17, 21.
- [3] 周岭, 周福君, 蒋恩臣, 等. 棉秆不同组分热解特性及动力学[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 220-225.
- [4] 曹新新, 沈伯雄. 棉秆催化热解的热重分析[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2009, 42(5): 25-31.
- [5] 别尔德汗·瓦提汗, 亚力昆江·吐尔逊, 迪丽努尔·塔力甫, 等. 载镍橄榄石催化剂对棉秆热解的影响[J]. 可再生能源, 2018, 36(7): 969-976.
- [6] 邓聚龙. 灰色理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [7] 杜启, 唐初阳, 安新元, 等. 基于模型化合物的脱硫灰催化提质生物质热解气研究[J]. 可再生能源, 2023, 41(6): 711-716.
- [8] 陈明强, 齐雪宜, 王君, 等. 棉秆催化热解特性及动力学建模研究[J]. 燃料化学学报, 2011, 39(8): 585-589.
- [9] 牛璐瑶, 葛炬. 基于灰色预测模型的河南省多式联运货运量预测研究[J]. 物流科技, 2024, 47(17): 88-91.
- [10] 杨璞, 郑文轩. 棉秆热解特性的分析[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(16): 3915-3917.
- [11] 付迁, 徐圆圆, 闫永波, 等. 污泥棉花秆共热解特性的响应面优化分析[J]. 燃烧科学与技术, 2023, 29(6): 699-705.