



引用格式:宋丽丽,魏涛,杨旭,等.烟梗结构特征及其热解特性研究[J].轻工学报,2020,35(6):27-34.

中图分类号:TS49 文献标识码:A

DOI:10.12187/2020.06.004

文章编号:2096-1553(2020)06-0027-08

# 烟梗结构特征及其热解特性研究

## Study on structural and thermal decomposition characteristics of tobacco stem

宋丽丽,魏涛,杨旭,张志平,毛多斌

SONG Lili, WEI Tao, YANG Xu, ZHANG Zhiping, MAO Duobin

郑州轻工业大学 食品与生物工程学院,河南 郑州 450001

College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China

### 关键词:

烟梗;结构特征;动力学;热解特性;活化能

### Key words:

tobacco stem;  
structural characteristic;  
kinetic; thermal  
decomposition  
characteristic;  
activation energy

**摘要:**以河南产烟梗为研究对象,通过化学成分分析、红外光谱分析和结晶度分析对其进行结构表征,利用热重分析法研究烟梗的热解特性,并计算其热解动力学参数.结果表明:烟梗中纤维素、半纤维素、木质素和果胶质量分数分别为28.15%、20.01%、5.67%和5.32%,含有典型的生物质成分;烟梗具有木质纤维素特征结构基团;烟梗中纤维素的结晶度为25.37%,更易发生热解反应;烟梗热解过程中,纤维素、半纤维素和木质素的热解失重率分别为18.83%、17.89%和15.06%,对应的热解反应活化能分别为31.72 kJ/mol、27.82 kJ/mol和58.99 kJ/mol,其中纤维素和半纤维素热解过程符合一级化学反应,木质素热解过程符合三级化学反应.

收稿日期:2020-05-14

基金项目:国家自然科学基金项目(21706244);河南省科技攻关项目(152102110104);郑州轻工业大学博士基金项目(2013BSJJ005)

作者简介:宋丽丽(1987—),女,河南省信阳市人,郑州轻工业大学讲师,博士,主要研究方向为烟草资源综合利用.

**Abstract:** The structure of tobacco stems from He'nan province was characterized by chemical composition analysis, infrared spectrum analysis and crystallinity analysis. The thermal decomposition characteristics of tobacco stems were studied by thermogravimetric analysis, and the pyrolysis kinetic parameters were also calculated. Results showed that there were typical biomass components in tobacco stems, and the contents of cellulose, hemicellulose, lignin and pectin were 28.15%, 20.01%, 5.67% and 5.32%, respectively. There were characteristic structural groups of lignocellulose in tobacco stem. The crystallinity of tobacco stem was 25.37%, which indicated that the pyrolysis reaction of tobacco stem was easier to be carried out. During the pyrolysis of tobacco stems, the weight loss of cellulose, hemicellulose and lignin were 18.83%, 17.89% and 15.06%, respectively. Corresponding activation energies of pyrolysis reactions were 31.72 kJ/mol, 27.82 kJ/mol and 58.99 kJ/mol, respectively. The pyrolysis of cellulose and hemicellulose were dominated by a first-order chemical reaction, while lignin pyrolysis was controlled by a third-order chemical reaction.

## 0 引言

我国是烟草生产大国,每年烟叶产量约为  $4.5 \times 10^6 \sim 5.0 \times 10^6$  t,烟梗是烟叶的一部分,约占烟叶质量的25%<sup>[1-2]</sup>。目前,就我国烟梗利用情况来看,将烟梗经过合理加工制成高填充性的梗丝,添加到卷烟配方中,是烟梗利用的重要途径<sup>[3]</sup>。经膨化加工后的梗丝不仅具有成本低廉、加工便利、来源广泛等特点,还能发挥梗丝较强的支撑作用,增加烟丝的填充能力和燃吸时空气的透过量,达到降低消耗和提高烟支燃烧性能的目的,同时对降低卷烟焦油含量也有明显的作用<sup>[4]</sup>。烟梗的成分含量、结构性质和燃烧特性与烟叶不同,其对梗丝性能和卷烟香味、吃味都有直接影响。相对于叶片来说,烟梗木质素、纤维素、果胶等细胞壁物质含量较高,而总糖含量较低<sup>[5-6]</sup>。因此,如何减轻烟梗的木质气、刺激性等不良吸味,改善烟梗的吸食品质,提高烟梗的利用率,是烟草行业面临的重要课题<sup>[7]</sup>。

卷烟在抽吸过程中会发生一系列燃烧和热解反应,利用热重分析法可以揭示烟草在不同热转化条件下的热解燃烧变化及产物转化规律<sup>[8-9]</sup>,是解析烟草阴燃和抽吸状态下烟气释放规律与温度分布内在联系的重要研究手段。研究卷烟的热解动力学数据,对卷烟热解数学

模型的建立具有重要意义。目前,对烟草的热解研究主要是利用热重联用技术分析升温速率对烟草热解和燃烧行为的影响<sup>[10]</sup>,以及利用分布活化能模型对烟草的热解动力学参数进行计算<sup>[11]</sup>等。张亚平等<sup>[12]</sup>研究了37个不同产地、不同部位烤烟烟叶的热解燃烧反应和热解动力学参数,探究适合卷烟烟叶转化率与热解活化能的变化分布规律,发现低温段的活化能高于高温段,即纤维素、半纤维素的热解参与程度高于木质素。王莉等<sup>[13]</sup>对再造烟叶的微观结构和热解性能进行研究,结果表明,疏松多孔、纤维木质化程度低的再造烟叶具有较低的热分解温度和较高的热失重速率。C. R. Cardoso等<sup>[14]</sup>通过Ozawa法、Starink法和三组分独立反应平行模型研究烟草废弃物的热解反应过程,发现3种模型计算得出的热解反应活化能结果相差较大,需对不同模型进行比较研究。

目前烟草行业对卷烟热反应性质的研究多集中于叶片,对烟梗的热解特性研究较少,特别是其热解机理及热反应动力学方程。鉴于此,本文拟通过对烟梗的化学成分分析、红外光谱分析和结晶度分析系统研究其结构特征,利用热重分析法研究适合烟梗热解反应的动力学方程,确定烟梗热解反应动力学参数,以期为进一步研究烟梗结构特征对热解机制的影响提供理论依据,进而提升烟梗的综合利用率。

## 1 材料与方法

### 1.1 主要材料与试剂

烟梗,由河南中烟工业有限责任公司提供,产地为河南,自然晾干后存放;单糖标准品:葡萄糖、木糖、阿拉伯糖,均为色谱纯,上海阿拉丁生化科技有限公司产;吡啶(分析纯),国药集团化学试剂有限公司产;KBr(光谱纯),上海麦克林生化科技有限公司产。

### 1.2 仪器与设备

UV-1800 紫外可见分光光度计,上海美谱达仪器有限公司产;Agilent 7820A 高效液相色谱仪,美国安捷伦公司产;Diamond TG/DTA 综合热分析仪,美国 Perkin Elmer 公司产;HWS-24 电热恒温水浴锅、DHG-9245A 电热恒温鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司产;ME204/02 电子天平,上海舜宇恒平科学仪器有限公司产;D8 DISCOVER X-射线衍射(XRD)仪、VERTEX 70 傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪,德国 Bruker 公司产。

### 1.3 实验方法

**1.3.1 烟梗化学成分的测定** 采用美国国家可再生能源实验室(NREL)方法<sup>[15]</sup>测定烟梗中纤维素、半纤维素、木质素的质量分数;采用吡啶分光光度法<sup>[16]</sup>测定烟梗中果胶的质量分数;采用烟草行业内部标准方法<sup>[17-18]</sup>测定烟梗中烟碱和总糖的质量分数。

**1.3.2 烟梗 FTIR 的检测** 不同基团的吸收波长和强度明显不同,通过 FTIR 可以定性分析烟梗的结构特征<sup>[19]</sup>。具体操作为:将烟梗样品与 KBr 按 1:200 的质量比在玛瑙研钵内研磨混匀,制成圆形均匀的透明薄片,放入 FTIR 仪中进行检测。检测条件为:光谱范围 400~4000  $\text{cm}^{-1}$ ,采样速率 80 张/s,分辨率 0.4  $\text{cm}^{-1}$ 。

**1.3.3 烟梗结晶度的检测** 烟梗中纤维素的结晶度可以在一定程度上体现烟梗的结构特征

和物理特性,是评价生物质材料机械性能和纤维素质量的重要依据。根据文献[20]中的方法,采用 XRD 对烟梗的结晶度进行检测。检测条件为:X 光管为 Cu 靶,电压为 40 kV,电流为 30 mA,扫描衍射角  $2\theta$  的范围为  $10^\circ \sim 50^\circ$ ,扫描速率为 0.02 mm/s。结晶度  $CrI$  计算公式如下:

$$CrI = \frac{I_{002} - I_{001}}{I_{002}} \times 100\%$$

其中, $I_{002}$  ( $2\theta = 22.5^\circ$ ) 为结晶区域的衍射强度, $I_{001}$  ( $2\theta = 18.6^\circ$ ) 为纤维无定型区域的衍射强度。

**1.3.4 烟梗热解性能分析** 烟草和卷烟的热解特性与其感官品质、烟气中香味成分的形成及有害物质的释放等密切相关<sup>[21]</sup>。热重分析法可实时检测烟草在特定燃烧热解环境下质量随温度的变化关系,通过热失重(TG)和微分热失重曲线(DTG)可获得烟草燃烧热解过程中的关键特征参数(包括起始热解温度、最大失重温度、最大失重速率、热解残留量等),进而判断烟草的热稳定性<sup>[22]</sup>。因此,本文采用热重分析法对烟梗的热解反应动力学进行分析。具体操作为:称取 5 mg 烟梗样品,采用等速升温的方式,升温速度为 10  $^\circ\text{C}/\text{min}$ ,从室温升温至 700  $^\circ\text{C}$ ,保持载气流量为 40 mL/min。使用 Coats and Redfern's 积分法计算活化能<sup>[23]</sup>。

### 1.4 数据处理

采用 Excel 2010 和 Origin 9.0 对数据进行处理并作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 烟梗化学成分分析

烟梗化学成分测定结果见表 1。由表 1 可知,烟梗中总糖质量分数为 13.15%,烟碱质量分数为 0.21%,这与王月侠等<sup>[24]</sup>的研究结果相符。纤维素和半纤维素总质量分数较高(48.16%),表现为典型的生物质特征。另外还

表1 烟梗化学成分测定结果

Table 1 Determination results of chemical components in tobacco stem %

样品	总糖	烟碱	果胶	纤维素
烟梗	13.15	0.21	5.32	28.15
样品	半纤维素	酸不溶木质素	酸溶木质素	灰分
烟梗	20.01	2.16	3.51	0.81

含有少量木质素(5.67%)和果胶(5.32%)等成分. 本研究选用的烟梗为河南本地烟梗,其细胞壁成分含量接近红河烟区 K326 上部烟梗,说明不同产地的烟梗化学成分差别不大,这与米兰等<sup>[25]</sup>的研究结果基本一致.

## 2.2 烟梗 FTIR 分析

烟梗的 FTIR 图如图 1 所示. 由图 1 可以看出,烟梗在波长  $3416\text{ cm}^{-1}$  附近有较大的吸收峰,此处对应的是纤维素中羟基的特征吸收峰<sup>[26]</sup>;  $1755\text{ cm}^{-1}$  和  $898\text{ cm}^{-1}$  分别对应半纤维素中聚木糖  $\text{C}=\text{O}$  伸缩振动和纤维中糖类  $\beta$ -糖苷键伸缩振动特征吸收峰<sup>[27]</sup>,说明烟梗中含有典型的纤维素和半纤维素结构.  $1510\text{ cm}^{-1}$  是木质素苯环中  $\text{C}=\text{C}$  双键振动形成的特征吸收峰,通常代表典型木质素的结构<sup>[28]</sup>,与化学成分分析结果一致.  $1320\text{ cm}^{-1}$  是木质素  $\text{C}=\text{O}$  伸缩振动特征吸收峰,  $1249\text{ cm}^{-1}$  是紫丁香基芳环与甲氧基键合的  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$  键不对称伸缩振动特征吸收峰<sup>[29]</sup>,说明烟梗木质素结构中含有紫丁香基结构单元. FTIR 分析结果表明,烟梗具有典型的木质纤维素特征结构基团,即含有纤维素、半纤维素和木质素的特征吸收光谱.

## 2.3 烟梗结晶度分析

烟梗纤维素结晶度的大小通常与纤维素中结晶区与非结晶区的大小及纤维素、木质素的含量密切相关,结晶度的大小表明烟梗纤维素的致密程度,是表征烟梗结构特性的重要因素. 烟梗的 XRD 图如图 2 所示. 由图 2 可以看出,烟梗在  $18.6^\circ$  和  $22.5^\circ$  附近均出现了相应的衍射峰,而在  $28.0^\circ$  至  $42.0^\circ$  间出现了弱衍射

峰,这可能是烟梗中所含的多糖及其他物质引起的<sup>[30]</sup>. 根据烟梗在结晶区与非结晶区的衍射峰强度,计算可知烟梗纤维素的结晶度为 25.37%,较典型的生物质原料农作物秸秆(结晶度通常为 35%~45%<sup>[31]</sup>),烟梗的结晶度较低,表明烟梗中高度有序排列的晶型结构区域较少,纤维素大分子颗粒直径小,结构上趋于松散和无定型状态,更容易被破坏,因此烟梗更易发生热解反应.

## 2.4 烟梗热解反应动力学分析

### 2.4.1 烟梗热失重特性

对热重分析得到的 TG 曲线求导得到 DTG 曲线,使用切线法<sup>[32]</sup>确定烟梗快速热分解阶段的初始温度  $T_{\text{onset}}$  和终止温度  $T_{\text{offset}}$  (见图 3). 根据烟梗的 DTG 曲线可将烟梗热解过程分为 3 个阶段:1) 室温到  $T_{\text{onset}}$

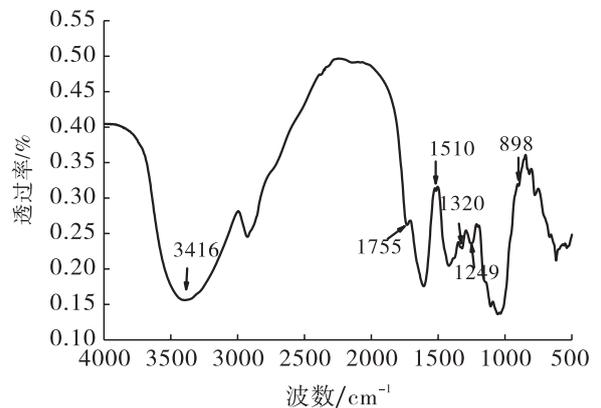


图1 烟梗的 FTIR 图

Fig. 1 FTIR spectrum of tobacco stem

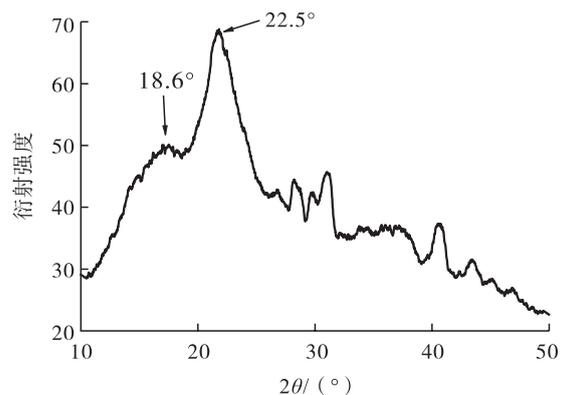


图2 烟梗的 XRD 图

Fig. 2 X-ray diffraction patterns of tobacco stem

区间为水分析出阶段,表现为烟梗中的水分蒸发;2)  $T_{\text{onset}}$  到  $T_{\text{offset}}$  区间为活化反应阶段(快速热解阶段),表现为烟梗中的小分子有机物、半纤维素、纤维素引起的挥发成分析出,以及燃烧在此区间内连续发生;3)  $T_{\text{offset}}$  到  $T_{700}$  区间为慢速热解阶段,表现为残留的少量纤维素和木质素引起的挥发成分析出,以及与燃烧、固定碳燃烧、燃尽反应在此区间内连续发生。

根据图3中TG-DTG曲线可以得到热解过程中相应温度下烟梗的残余质量分数(见表2)。结合图3和表2可以得到烟梗中生物质三组分反应阶段的失重率(见表3),热解反应中生物质三组分失重率由高到低依次为:纤维素 > 半纤维素 > 木质素,这与其在烟梗中的含

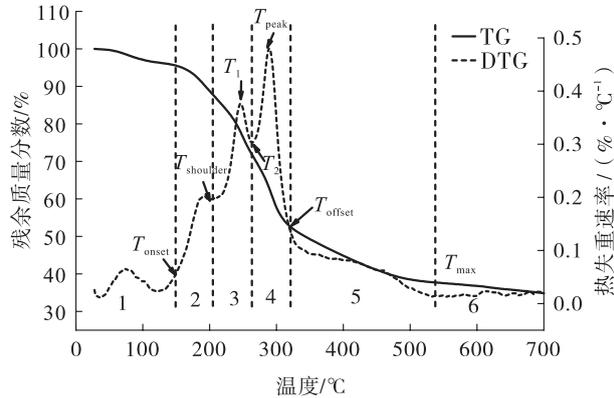


图3 烟梗的同步热分析曲线(TG-DTG曲线)

Fig. 3 Synchronous thermal analysis of tobacco stem (TG-DTG curve)

表2 热解过程中相应温度下烟梗的残余质量分数

Table 2 Residual quality score of tobacco stem at corresponding temperature during thermal decomposition

热解过程相应温度	残余质量分数/%
$T_{\text{onset}} = 149.3 \text{ } ^\circ\text{C}$	95.57
$T_{\text{shoulder}} = 196.4 \text{ } ^\circ\text{C}$	89.47
$T_1 = 246.2 \text{ } ^\circ\text{C}$	77.85
$T_2 = 264.1 \text{ } ^\circ\text{C}$	71.58
$T_{\text{peak}} = 289.3 \text{ } ^\circ\text{C}$	62.72
$T_{\text{offset}} = 319.5 \text{ } ^\circ\text{C}$	52.75
$T_{\text{max}} = 539.2 \text{ } ^\circ\text{C}$	37.69
$T_{700} = 700.0 \text{ } ^\circ\text{C}$	32.62

表3 烟梗中生物质三组分反应阶段的失重率

Table 3 Weight loss of three components of biomass in tobacco stem

生物质组分	温度区间	失重率/%
半纤维素	$T_{\text{shoulder}} \sim T_2$	17.89
纤维素	$T_2 \sim T_{\text{offset}}$	18.83
木质素	$T_{\text{offset}} \sim T_{\text{max}}$	15.06

量以及物质本身的热反应性质有关。

**2.4.2 烟梗热解反应动力学参数** 在描述热解过程时,阿伦尼乌斯(Arrhenius)公式将反应速度表示为

$$\frac{dx}{dt} = Kf(\alpha) \quad (1)$$

式中, $K$ 为阿伦尼乌斯常数,且

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

其中, $E$ 为活化能/( $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ), $A$ 为指前因子/( $\text{s}^{-1}$ ),气体常数  $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ , $T$ 为热力学温度/ $\text{K}$ 。

函数中 $f(\alpha)$ 的选取取决于反应机理,在简单反应中表示为

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n \quad (3)$$

其中, $n$ 为反应级数; $\alpha$ 为变化率,即热重反应失重率。

$$\alpha = \frac{w_0 - w}{w_0 - w_\infty} \quad (4)$$

其中, $w_0$ 为反应起始时物质的质量, $w$ 为反应某一时间物质的质量, $w_\infty$ 为反应结束时物质的质量。

联立式(2)—(4)可得:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (5)$$

当升温速度  $\beta = \frac{dT}{dt}$  恒定时,有

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) (1 - \alpha)^n \quad (6)$$

式(6)即为一个简单的热解反应动力学方程式。

将式(6)分离变量后积分可得

$$\int_0^\alpha \frac{d\alpha}{(1-\alpha)^n} = \frac{A}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) dT \quad (7)$$

使用 Coats and Redfern's 积分法对烟梗生物物质的热解反应动力学方程式进行推导可得

$$\ln\left[\frac{G(\alpha)}{T^2}\right] = \ln\frac{AR}{\beta E} - \frac{E}{RT} \quad (8)$$

该方程式不仅可求取最佳活化能,还可求得最适反应级数<sup>[33]</sup>。

参考表4所示几种常见的固相反应动力学模型<sup>[34-35]</sup>中各反应级数的参数特征,可得如下结果。

当反应级数  $n = 1$  时,式(8)可变为

$$\ln\left[\frac{-\ln(1-\alpha)}{T^2}\right] = \ln\left[\frac{AR}{\beta E}\left(1 - \frac{2RT}{E}\right)\right] - \frac{E}{RT} \quad (9)$$

当  $n \neq 1$  时,式(8)可变为

$$\ln\left[\frac{1 - (1-\alpha)^{1-n}}{T^2(1-n)}\right] = \ln\left[\frac{AR}{\beta E}\left(1 - \frac{2RT}{E}\right)\right] - \frac{E}{RT} \quad (10)$$

在一般的反应中,  $\frac{2RT}{E} \ll 1$ , 所以可将

$\ln\left[\frac{AR}{\beta E}\left(1 - \frac{2RT}{E}\right)\right]$  简化为  $\ln\left(\frac{AR}{\beta E}\right)$ , 看作常数,

即  $\ln\left[\frac{G(\alpha)}{T^2}\right]$  与  $\frac{1}{T}$  线性相关。因此,可以通过拟

合直线的斜率和截距计算动力学参数活化能  $E$  和指前因子  $A$ 。

由于烟梗的热解反应过程非常复杂,因此需要选用不同的机理函数  $f(\alpha)$ , 结合表4中的方程式,对烟梗热解过程进行拟合计算,得出的烟梗热解动力学参数如表5所示。通过比较表5中的  $R^2$  值,得出最适反应模型,即纤维素、半纤维素符合一级动力学方程,木质素符合三级动力学方程;半纤维素和纤维素的活化能与木质素的活化能相差较大,表明烟梗中木质素的降解较纤维素与半纤维素更难进行,这与木质素大分子空间网状结构有关。木质素在卷烟燃吸过程中会产生木质杂气,其热解产生的儿茶酚、烷基儿茶酚等物质不仅会引起涩口,而且具有促癌的特性<sup>[36]</sup>,这都限制了烟梗在卷烟中的添加比例。因此,采用适当的方法去除木质素是提高烟梗利用价值的一种有效途径。

### 3 结论

本文以河南产烟梗为研究对象,通过化学成分分析、红外光谱分析和结晶度分析其结构特征,以同步热重分析法研究其热解反应过程,以确定适合的反应方程和动力学参数。结果表

表4 几种常见的固相反应动力学模型

Table 4 The most common mechanism models used in solid-state material pyrolysis

模型类别	控制机制	$f(\alpha)$	$G(\alpha)$
化学反应控制模型	一级反应	$1 - \alpha$	$-\ln(1 - \alpha)$
	三级反应	$(1 - \alpha)^{\frac{3}{2}}$	$2[(1 - \alpha)^{-\frac{1}{2}} - 1]$
	二级反应	$(1 - \alpha)^2$	$(1 - \alpha)^{-1} - 1$
扩散控制模型	一维扩散	$1/2\alpha$	$\alpha^2$
	二维扩散	$-\ln(-\alpha)^{-1}$	$(1 - \alpha)\ln(1 - \alpha)$
	三维扩散	$3(1 - \alpha)^{\frac{3}{2}}[1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{3}}]$	$[1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{3}}]^2$

表5 烟梗的热解动力学参数

Table 5 The thermogravimetric parameters of tobacco stem

组分	温度范围/°C	失重率/%	相关系数 $R^2$	活化能 $E/(kJ \cdot mol^{-1})$	指前因子 $A/(s^{-1})$	符合的反应模型
半纤维素	196.4 ~ 264.1	17.89	0.992 4	27.82	2.067 8	一级化学反应
纤维素	264.1 ~ 319.5	18.83	0.982 7	31.72	1.587 8	一级化学反应
木质素	319.5 ~ 538.2	15.06	0.975 7	58.99	2 617.080 1	三级化学反应

明:1)烟梗含有典型的生物质成分,纤维素、半纤维素、木质素和果胶质量分数分别为28.15%、20.01%、5.67%和5.32%;2)烟梗具有典型的纤维素、半纤维素和木质素结构特征;3)烟梗纤维素的结晶度为25.37%,热解反应更容易进行;4)纤维素、半纤维素和木质素的热解失重率分别为18.83%、17.89%和15.06%,半纤维素和纤维素热解反应由一级化学反应控制,而木质素热解反应由三级化学反应控制,且木质素热解反应活化能最高,为58.99 kJ/mol,即木质素的降解最难进行。

本文研究结果为进一步研究烟梗结构特征对烟梗热解机制的影响奠定了基础,对确定烟梗热解机理具有重要意义,可为烟梗资源的综合利用提供参考。下一步可综合分析不同部位、不同产地烟梗差异化结构特征及热解动力学参数,为提升烟梗在卷烟行业的利用率,解决“新型烟草制品”、“减害降焦”等关键技术问题提供有力支撑。

#### 参考文献:

- [1] 李学军,王永金,刘尚友,等. 烟梗处理技术综述[J]. 轻工科技,2012(11):24.
- [2] 黄志强,包秀萍,高锐. 烟梗及其制品提质处理的研究进展[J]. 河南农业科学,2013,42(10):1.
- [3] 姚二民,周利军,李晓,等. 微波膨胀烟梗技术及其应用研究进展[J]. 轻工学报,2017,32(3):43.
- [4] KONSTANTINO E, FOTOPOULOU F, DROSOS A, et al. Tobacco-specific nitrosamines: A literature review[J]. Food and Chemical Toxicology, 2018, 118:198.
- [5] 郭高飞,刘朝贤,李斌,等. 烟粉和烟丝的热解燃烧特性及反应动力学分析[J]. 烟草科技, 2019, 52(6):90.
- [6] 宋丽丽,张永良,张志平,等. 白腐菌液体发酵降解烟梗木质素的研究[J]. 轻工学报,2019, 34(1):36.
- [7] 汤朝起,盛科,金永明,等. 不同产地不同部位烤烟烟梗品质评价[C]//上海烟草学会. 上海市烟草系统2011年度优秀学术论文集(工程技术类). 上海:[出版者不详],2011:91.
- [8] 杨滢,周顺,王孝峰,等. 不同结构烟草纤维素的燃烧热解特性[J]. 烟草科技,2017,50(5):38.
- [9] 秦国鑫,李斌,鲁端峰,等. 烟草生物质燃烧特性与机理研究[J]. 烟草科技,2015,48(1):76.
- [10] 廖津津,李巧灵,陈国钦,等. 升温速率对卷烟烟丝快速热解的影响[J]. 烟草科技,2016,49(10):44.
- [11] 王昭,戴亚,马扩彦,等. 基于分布活化能模型的烟草燃烧动力学特性研究[J]. 烟草科技, 2016,49(12):71.
- [12] 张亚平,宁敏,周顺,等. 国内典型烤烟烟叶的燃烧行为与动力学特性分析[J]. 安徽农业科学,2015,43(3):200.
- [13] 王莉,王驰,葛少林,等. 再造烟叶的纤维和组织微观结构及热解性能分析[J]. 烟草科技, 2016,49(10):66.
- [14] CARDOSO C R, MIRANDA M R, SANTOS K G, et al. Determination of kinetic parameters and analytical pyrolysis of tobacco waste and sorghum bagasse[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,2011,92(2):392.
- [15] SLUITER A, HAMES B, RUIZ R, et al. Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass[J]. Laboratory Analytical Procedure,2008,1617:1.
- [16] 杨海健,丁红营,于国东,等. 咔唑比色法测定造纸法再造烟叶中的果胶含量[J]. 分析试验室,2012,31(6):100.
- [17] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品 总植物碱的测定 连续流动法:YC/T 160—2002

- [S]. 北京:中国标准出版社,2002.
- [18] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品 水溶性糖的测定 连续流动法:YC/T 159—2002 [S]. 北京:中国标准出版社,2002.
- [19] 吴舜,楼宏铭,莫贤科,等. 中红外光谱法测定烟草中的木质素[J]. 烟草科技,2014(10):67.
- [20] WAN J, WANG Y, XIAO Q. Effects of hemicellulose removal on cellulose fiber structure and recycling characteristics of eucalyptus pulp[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101:4577.
- [21] 周顺,王孝峰,何庆,等. 烟草及烟草制品燃烧 & 热解检测分析技术研究进展[J]. 中国烟草学报,2017,23(2):130.
- [22] 周顺,王程辉,徐迎波,等. 烤烟、白肋烟和香料烟的燃烧行为和热解气相产物比较[J]. 烟草科技,2011(2):35.
- [23] SUN Y, HE Z, TU R, et al. The mechanism of wet/dry torrefaction pretreatment on the pyrolysis performance of tobacco stalk[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 286:121390.
- [24] 王月侠,葛善礼,贾涛,等. 烟梗化学组成的分析[J]. 烟草科技,1996(3):16.
- [25] 米兰,王保兴,周桂园,等. 再造烟叶烟梗原料化学成分及梗膏感官质量分析[J]. 湖北农业科学,2019,58(5):80.
- [26] PANDEY K K, PITMAN A J. FTIR studies of the changes in wood chemistry flowing decay by brown-rot and white-rot fungi[J]. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2003, 52:151.
- [27] PAREEK N, GILLGREN T, JNSSON L J. Adsorption of proteins involved in hydrolysis of lignocellulose on lignins and hemicelluloses [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 148:70.
- [28] 宋丽丽,张志平,王光路,等. 不同预处理方法对烟杆酶解产糖和结构特征的影响[J]. 轻工学报,2019,34(3):52.
- [29] RUDAKIYA D M, GUPTE A. Assessment of white rot fungus mediated hardwood degradation by FTIR spectroscopy and multivariate analysis [J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2019, 157:123.
- [30] SILVA G G D, ROUAU S G. Successive centrifugal grinding and sieving of wheat straw [J]. *Powder Technology*, 2011, 208(2):266.
- [31] 宋丽丽. 白腐菌高效改性木质素促进秸秆酶解反应机制研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
- [32] DHYANI V, BHASKAR T. A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass[J]. *Renewable Energy*, 2018, 129:695.
- [33] ZI W, CHEN Y, PAN Y, et al. Pyrolysis, morphology and microwave absorption properties of tobacco stem materials[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 683:341.
- [34] CAI J X, LI B, CHEN C Y, et al. Hydrothermal carbonization of tobacco stalk for fuel application [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 220:305.
- [35] WHITE J E, CATALLO W J, LEGENDRE B L. Biomass pyrolysis kinetics: A comparative critical review with relevant agricultural residue case studies [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2011, 91(1):1.
- [36] 朱大恒,韩锦峰,周御风. 利用产香微生物发酵生产烟用香料技术及其应用[J]. 烟草科技,1997(1):30.