文章编号：1000-5773(2012)02-0227-08

蒸汽爆破对玉米秸秆理化特性的影响*

任天宝[1,2]，徐桂转[2]，马孝琴[1]，于政道[2]，宋安东[2]，张百良[2]

（1.河南科技学院，河南新乡　453003；
2.农业部农村可再生能源重点开放实验室，河南郑州　450002）

摘要：在木质纤维素研究领域，对其理化特性进行深入研究有利于资源化开发利用。基于热解实验、傅立叶红外光谱、X射线衍射和扫描电镜分析方法，针对玉米秸秆蒸汽爆破后理化特性的变化进行了研究。结果表明：玉米秸秆蒸汽爆破后热解区域比对照具有更宽的温度范围，最大热分解速率显著提高，反应活化能降低16.25%；木质纤维素特征官能团所对应的特征峰吸收强度差异显著；细胞壁的层次结构破碎化，纤维素结晶度降低14.57%。在此基础上构建了蒸汽爆破过程机理模型。实验结果表明：蒸汽爆破对木质纤维素类材料理化特性的改变有显著影响。

关键词：蒸汽爆破；玉米秸秆；理化特性；机理模型
中图分类号：O521.9；TK6；S216　　**文献标识码**：A

1　引　言

目前，持续消耗大量的化石燃料，严重破坏生态环境，导致前所未有的气候变化，这种不可持续的消费方式又在加速耗尽传统的化石资源[1]。生物质作为重要的可再生资源，是潜在的能源和化工原料[2-3]。因此，开展生物质能转换技术的研究，将为其资源综合利用和增加清洁能源供应提供重要途径[4]。

木质纤维素预处理技术是实现能源转化和化工平台化合物原料的关键，已经成为科研人员关注的焦点[5]。蒸汽爆破主要是利用高温高压蒸汽，通过瞬间释放压力过程，实现原料的组分离散和结构变化[6]。由于其具有处理时间短、化学试剂用量少、无污染、能耗低等优点，因而被认为是未来实现生物炼制发展的重要途径[7]。Karin等[7]进行了蒸汽爆破玉米秸秆同步糖化发酵制取乙醇的研究，乙醇浓度达到25 g/L。Mason等[8]采用高压蒸汽作为操作流体，在压力6.9 MPa和温度285 ℃时把废材变成工业纸浆，并已经初步实现工业化。陈洪章等[9]进行了麻黄空气耦合汽爆碎壁及麻黄碱提取的中草药实验研究，提取收率为98.0 %，占麻黄碱含量的94.23 %。王许涛等[10]对纤维原料汽爆预处理技术与应用研究表明，当蒸汽压力3.0 MPa、维压时间90 s时，沼气产量达到304.72 mL/g(秸秆)。

综上所述，蒸汽爆破预处理技术在生物质利用领域得到了广泛的研究，但仅侧重于蒸汽爆破预处理技术对目标产物影响的研究，而对理化特性的影响研究甚少。本研究采用新型连续蒸汽爆破技术，基于热解实验、傅立叶红外光谱、X射线衍射(XRD)和扫描电镜(SEM)分析方法，深入研究蒸汽爆破对木质纤维素类物质理化特性的影响，旨在为蒸汽爆破技术的应用提供理论基础。

2　材料与方法

2.1　材料

玉米秸秆原料(以下简称为CS)来源于新乡市延津县农田，蒸汽爆破预处理玉米秸秆(以下简称为SECS)。蒸汽爆破预处理工艺：试样粒径小于或等于4 mm，物料含水率为12%，蒸汽爆破压强为

* **收稿日期**：2010-12-16；**修回日期**：2011-08-19
基金项目：国家自然科学基金(70741032)；国家农业科技成果转化资金资助项目(2006G B2D000173)
作者简介：任天宝(1981—)，男，博士，副教授，主要从事生物质可再生能源转化技术研究. E-mail：tianbao1016 @126.com
通讯作者：张百良(1941—)，男，教授，主要从事生物能源与环境工程研究与管理. E-mail：hauzblo@126.com

2.5 MPa,维压时间 150 s。样品经收集、压滤及烘干后粉碎备用。

2.2 蒸汽爆破设备

实验设备为农业部可再生能源重点实验室与鹤壁正道重型机械公司共同研发的新型蒸汽爆破工艺试验台,主要由蒸汽发生器、蒸汽爆破腔、物料收集腔和智能控制系统等组成,如图 1 所示。

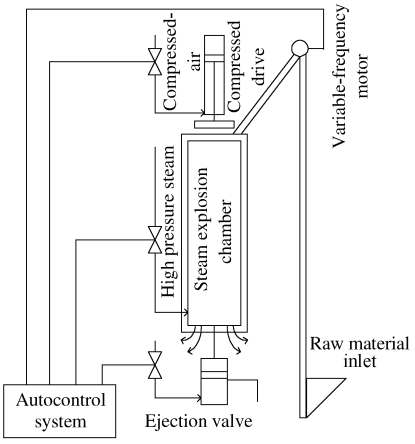


图 1 蒸汽爆破设备装置示意图

Fig. 1 Sketch map of steam explosion equipment

2.3 分析方法

2.3.1 热重分析

热重分析(TGA)[11]采用珀金埃尔默 Diamond TG/DTA 进行。每次称取 6 mg 样品,颗粒大小为 140～200 目,放入加盖的氧化铝坩埚内,将坩埚置于热重分析仪的分析室内。在热分析仪中通入高纯度氮气(99.95%)作为载气,流量为 100 mL/min,以保证能够及时将气相产物带走,避免二次反应对试样瞬间失重带来的影响。升温速率为 20 ℃/min,终温为 800 ℃。

2.3.2 傅立叶红外光谱分析

傅立叶红外光谱(FTIR)分析[12-13]采用 KBr 压片法 ,试样量 2 mg/g KBr,在 8700 FT-IR 红外光谱仪上进行扫描, 扫描速度为 35 次/秒,分辨率为 4 cm^{-1},波长范围 400～4 000 cm^{-1}。采用 Nicolet Omnic 红外光谱软件 Ver7.3,根据 FTIR 测试结果对玉米秸秆蒸汽爆破后官能团的变化进行分析,采用两点基线法,研究其化学结构的变化。

2.3.3 X 射线衍射(XRD)分析

采用布鲁克 AXS-D8 型 X 射线衍射仪。样品过 120 目筛,X 射线管为铜靶,管电压 40 kV,电流 30 mA,采用 2θ 联动扫描,扫描范围 5°～90°,取样间隔 0.04°。采用 MDI-JADE5.0 分析软件进行图谱分析和结晶度计算,并根据(1)式计算试样的结晶度

$$\text{结晶度} = \frac{\text{衍射峰强度}}{\text{总强度}} \tag{1}$$

2.3.4 扫描电镜(SEM)分析[14]

采用日本电子株式会社 S3400-环境扫描电镜,加速电压为 5～10 kV。试样粉碎至 60～12 目,置于 102～105 ℃的恒温干燥箱中烘干至恒重,分别将样品进行镀膜处理。试样分为 3 种:(Ⅰ) CS 原样,(Ⅱ) 试样完成蒸汽保压过程,但未经爆出,(Ⅲ) 蒸汽爆破秸秆试样。

3 结果与讨论

3.1 蒸汽爆破玉米秸秆热重分析

热重分析(TGA)是研究物质受热分解过程的重要方法。通过对热失重曲线的分析,可以了解该物质随温度的变化过程,进而评定其热特性[15]。图 2 和图 3 分别为 CS 和 SECS 分别在 20 ℃/min 升温速率下的热解失重(DGA)曲线、失重微商(DTG)曲线和差热(DTA)曲线。

从图 2 和图 3 可以看出,CS 和 SECS 的热解过程可以分为 3 个阶段:加热、快速失重和缓慢失重,且 DTA 曲线有显著差异。第 1 阶段从室温到 180 ℃附近,在 110 ℃附近有水分析出,主要为秸秆试样表层的吸附水,表现为 TGA 曲线下滑,DTG 曲线有一小峰。当温度达到 150 ℃附近时,二者的组分开始进行热分解。第 2 阶段 200～380 ℃,随着温度的上升,热分解速率加快,形成较大的热失重,但是 SECS 比 CS 相对变化较快。对于 CS 试样,热失重明显阶段主要分布在 200～360 ℃,最大热分解速率的温度 T_{max} = 318.3 ℃,失重微商为 7.040%/min;而对于 SECS 试样,热失重明显阶段分布在 180～

385 ℃,最大热分解速率温度 T_{max}=336.3 ℃,失重微商为 9.474%/min。第 3 阶段为 380～800 ℃,是残留物的缓慢分解过程,并在最后生成灰分,失重微商变化也较慢。从热解过程结果的对比可以看出,在蒸汽爆破预处理的作用下,SECS 试样中半纤维素部分降解或溶出,使得热解区向低温区移动,最大分解速率温度 T_{max} 向较高温区域移动,该温度区域试样的热解失重迅速,最大失重微商增加 34.57%,并且热解区域具有更宽的温度范围。另外,热解终止温度(800 ℃)残留物的质量分数高于对照 7.12%,与宋春财等对纤维素、半纤维素和木质素 3 种单组分的热重分析结果具有一致性,认为三者的热解特性相差很大,其中半纤维热解主要集中在 250～340 ℃,纤维素在 300～400 ℃,而木质素的热解开始较早,发生在一个相当宽的范围[16]。通过 Kissinger 法计算测得 SECS 比 CS 的热解活化能(E)降低 16.25%。

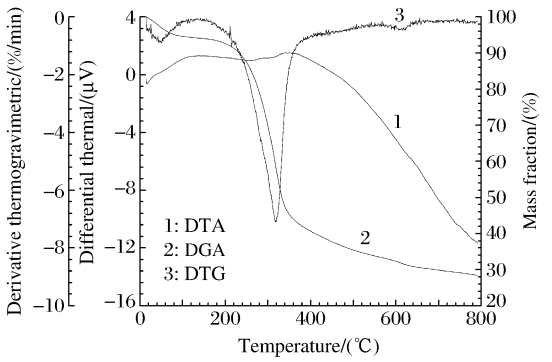


图 2 CS 热重曲线

Fig. 2 Thermogravimetric(TG) curves of CS

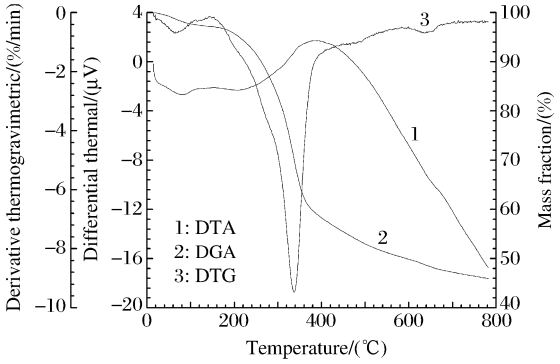


图 3 SECS 热重曲线

Fig. 3 Thermogravimetric(TG) curves of SECS

3.2 红外光谱分析

红外光谱(FTIR)法特别适于鉴定有机物、高聚物以及其它复杂结构的天然及人工合成产物的化学结构,具有高度的特征性[17]。图 4 为试样的红外光谱图。

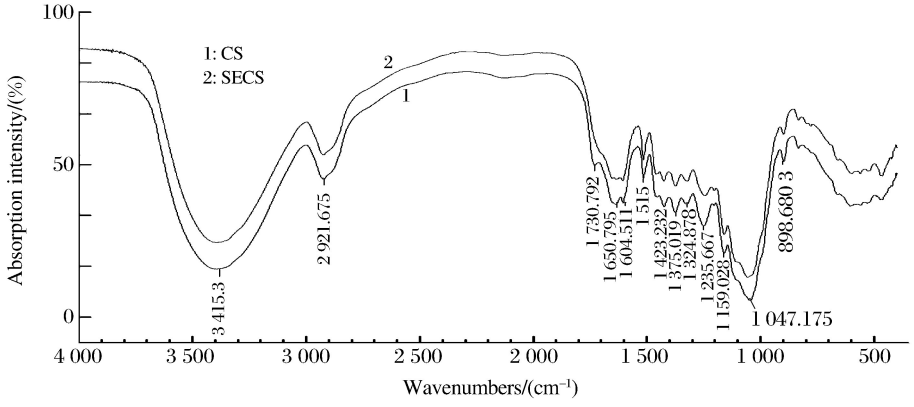


图 4 CS 与 SECS 的红外光谱图

Fig. 4 Fourier transform infrared spectroscopy spectra of CS and SECS

试样 FTIR 图谱的解析如表 1 所示,方法参见文献[13,18-19],可以得到以下结论。

(1) 3 415 cm^{-1} 位置附近的吸收光带是由酚羟基或醇羟基引起的,一般认为羟基是纤维素的主要红外敏感基团,这些羟基经常具有较强的氢键。从该位置羟基(—OH)吸收强度看,SECS 大于 CS,说明在蒸汽爆破过程中,羟基含量高的半纤维素和木质素发生部分降解。

(2) 半纤维素是线型的天然多糖,分子中所含有的单糖基种和其它侧基不同而异,但 1 730 cm^{-1} 附近的乙酰基和羧基上的 C＝O 伸缩振动吸收峰是半纤维素区别于其它组分的特征。从该位置羰基(C＝O)吸收强度看,CS 大于 SECS。CS 在 1 730 cm^{-1} 处有明显的吸收峰,SECS 在此处的吸收峰

减弱。

(3) 1 235 cm^{-1}位置附近的吸收光带由于半纤维素的 CO—OR 伸缩振动,从该位置的 CO—OR 吸收强度看,SECS 大于 CS。汽爆之后在 1 000～1 630 cm^{-1}波数范围,纤维素和木质素的 C—O 和 CH_2 基团特征峰都有不同程度的增加,1 421 cm^{-1}纤维素特征吸收峰增强,896 cm^{-1}附近是葡萄糖苷特征吸收峰,此处吸收峰强度随着压力的增加而减弱。

表 1 CS 与 SECS 的红外光谱解析

Table 1 Parse of FTIR spectra of CS and SECS

Absorption peak/(cm^{-1})	Characteristic group vibrations
3 415	Stretching vibration of —OH (Phenolic hydroxyl or Alcoholic extract hydroxyl group)
2 937	Stretching vibration of —C—H
1 730	Stretching vibration of C = O (Polyxylose)
1 650	Characteristic absorption peak of benzene ring
1 515	Characteristic group vibrations of benzene ring
1 426	Flexural vibration of CH_2(Cellulose), Flexural vibration of CH_3(Lignin)
1 423	Stretching vibration of —OCH_3 and C—H from lignin
1 375	Flexural vibration of CH (Cellulose and Hemicellulose)
1 331	Characteristic group vibrations of C—O(Lignin)
1 235	Stretching vibration of CO—OR(Hemicellulose)
1 220	Stretching vibration of —CO (Phenolic hydroxyl)and C—O—C(Carbohydrate)
1 159	Stretching vibration of C—O—C (Cellulose and Hemicellulose)
915	Characteristic group vibrations of nature syringyl
898	Characteristic group vibrations of D— glucosidic bond (Carbohydrate)

3.3 XRD 分析

研究表明,玉米秸秆中含有一些结晶区和非结晶区,X 射线衍射分析反映出有一定的结晶度。CS 和 SECS 的 XRD 图谱分别如图 5 和图 6 所示。

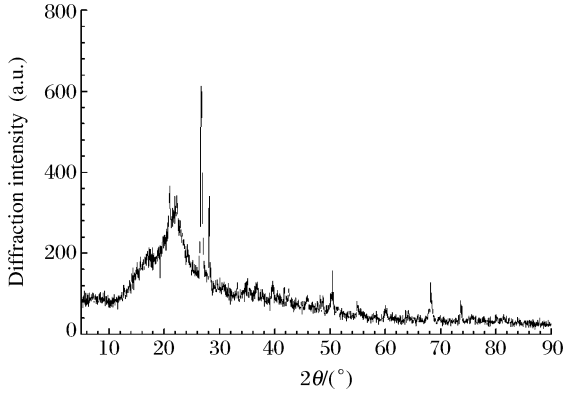


图 5 CS 的 XRD 谱

Fig. 5 X-ray diffraction pattern of CS

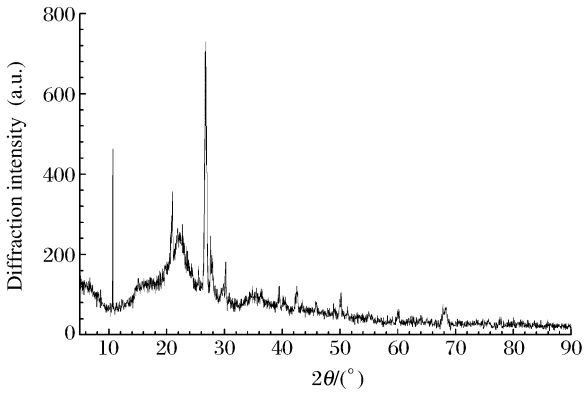


图 6 SECS 的 XRD 谱

Fig. 6 X-ray diffraction spectra of SECS

从图 5 可以看出,CS 在 $2\theta=22°$附近有一极大峰,这是(002)晶面的衍射峰;在 $2\theta=49°$附近有一小峰,这是(040)晶面衍射峰,$2\theta=22°$的衍射峰主要是因为纤维素内葡萄糖分子所在的平面基本上平行于(002)晶面[20]。从图 6 可以看出,$2\theta=22°$附近有一极大峰,但远小于对照的极大峰,表明试样的结晶度

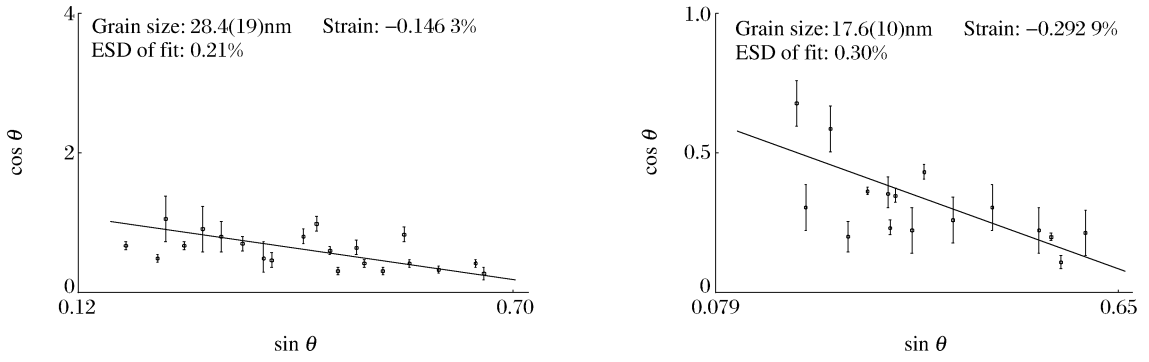
发生较大变化。$2\theta=26.8°$处的衍射峰是试样中存在的 SiO_2 的衍射峰[21],根据其强度可以判断,由于半纤维素含量的减少,使得 SECS 中 SiO_2 的质量分数相对增加。从表 2 可以看出,二者峰数相差 6 个,蒸汽爆破后玉米秸秆的结晶度下降了 14.57%。

表 2　CS and SECS 的 XRD 谱分析

Table 2　X-ray diffraction pattern analysis of CS and SECS

Material	Peak number	p_{max}/(N)	Total area(nm^2)	Fitting error/(%)	Crystallinity/(%)
CS	27	8.8	181.15	12.6	51.60
SECS	21	9.2	88.47	11.8	37.03

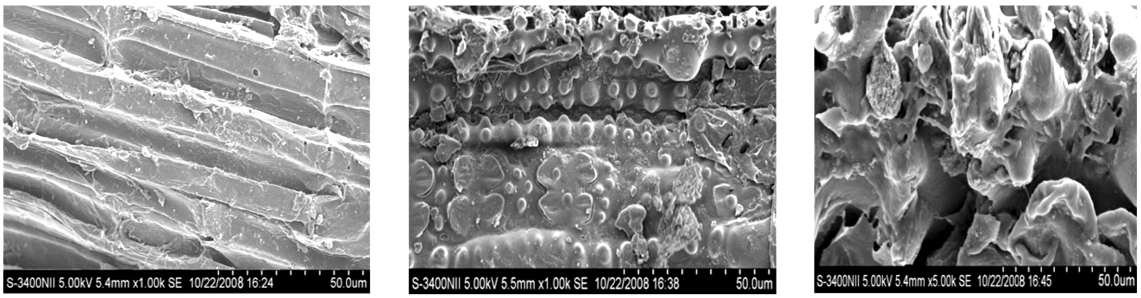
在以上分析的基础上,模拟计算了试样的平均晶粒尺寸及微观应力的变化,如图 7 和图 8 所示。从图 7 可以看出,对照组玉米秸秆的平均晶粒尺寸约为 28.4 nm,结晶体排列相对有序致密。从图 8 可以看出,蒸汽爆破玉米秸秆的平均晶粒尺寸约为 17.6 nm,结晶体排列相对杂乱稀疏。与对照组相比,平均晶粒尺寸减少 38.03%,微观应力改变量为 100.20%。微观应力的改变主要是由于高温高压蒸汽作用的结果,在晶体内部产生微观应变,发生晶粒错位或破碎,从而引起结晶度发生较大的变化。



(a) CS　　(b) SECS

图 7　CS 和 SECS 平均晶粒尺寸及微观应变

Fig. 7　Average grain size and micro-strain of CS and SECS



(a) Sample Ⅰ　　(b) Sample Ⅱ　　(c) Sample Ⅲ

图 8　玉米秸秆蒸汽爆破预处理过程 SEM 观察

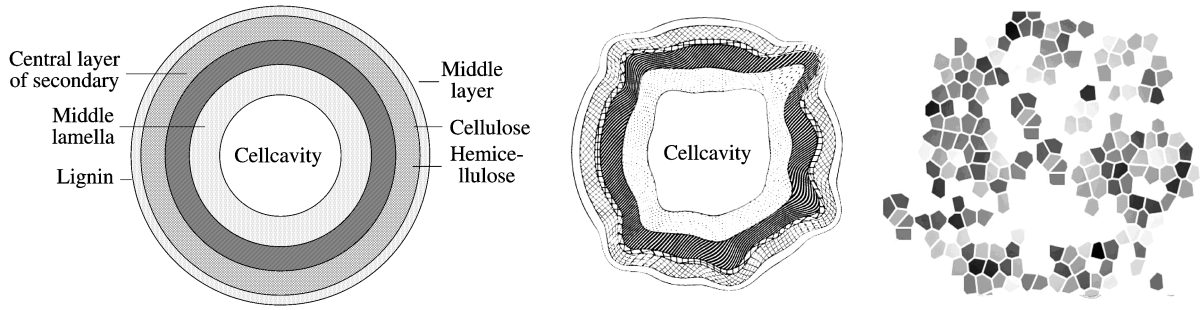
Fig. 8　SEM imagines of corn stalks by steam explosion pretreatment

3.4　扫描电镜分析

图 8(a)为玉米秸秆原样扫描电镜像,基本呈现有序平行整齐的纤维束状排列,结构致密,通过胞间连丝彼此紧紧交联在一起;图 8(b)为经蒸汽保压未爆的试样扫描电镜像,其结构发生明显变化,这是由于高温高压蒸汽通过亲水性木质化细胞和细胞壁上纹孔进入到细胞壁内[22],当细胞壁外环境压强减少时,在高压蒸汽的作用下,细胞壁表面呈现“鼓泡状”或“瘤状”,木质素纤维的微管束部分破裂,发生“凸

状”形变，致密的结构组织发生变化，但还具有细胞壁的层次结构[23]。蒸汽爆破后试样的扫描电镜像如图 8(c)所示，结构破碎并呈现无序、多孔隙状态，如“蜂窝”状，细胞壁层次结构被破坏，细胞壁的主要成分纤维素和半纤维聚合度明显下降。

基于以上分析，蒸汽爆破过程的机理可以分为两个阶段。第一阶段，自然状态的玉米秸秆细胞壁模式如图 9(a)所示，细胞壁内部的压力用 p_{inner} 表示，此时 $p_{\text{inner}} \approx p_0$（$p_0 = 0.101$ MPa），$T_{\text{inner}} = T_0$，当汽爆腔注入高压蒸汽时（$p_{\text{steam}} = 3.5$ MPa，$T_{\text{steam}} = 242$ ℃），高温高压蒸汽形成能量场，通过亲水性木质化细胞和细胞壁上的纹孔迅速渗透到细胞壁内部，根据傅里叶定律，在爆腔中任一点处，沿任一方向的热流强度与该方向上的温度变化率成正比[24]。维压一定时间后，细胞壁内、外处于动态压强平衡，$p_{\text{inner}} \approx p_{\text{steam}}$，$T_{\text{inner}} \approx T_{\text{steam}}$。此时，高压高温蒸汽具有物理和化学性双重效应：一方面由于细胞壁厚度非均匀性，致使细胞层次结构开始发生形变，形成“凸起”，如图 9(b)所示，这一过程简称为“热胀”；另一方面，$T_{\text{steam}} = 242$ ℃高温蒸汽，根据前部分热重分析的结果，表明半纤维和木质素已经发生化学反应，并开始部分降解，生成一些寡聚糖和单糖，以及乙酸、糠醛和丁香醛等物质[25]。第二阶段，维持一段时间后，汽爆腔瞬间弹开，爆腔内的蒸汽压力 p_{steam} 瞬间减小到 p_0 状态。在这一过程中，一方面由于细胞壁的屏蔽作用，使细胞壁内、外存在大的压力差 $\Delta p = p_{\text{steam}} - p_0$，在径向胀力和剪切力的作用下，细胞壁发生碎变；另一方面，由于蒸汽在瞬间释放过程中形成较高强度的冲击波，产生更多的“有效碰撞”，致使纤维素和半纤维素的聚合链呈现“片段化”或“破碎化”。由此，形成的爆浆模型如图 9(c)所示，这一过程准确地称为爆破。



(a) Cellwall structure of com stalk　(b) Cellwall structure under steam injection　(c) Cellwall structure after steam explosion

图 9　蒸汽爆破预处理过程机理模型示意图

Fig. 9　Mechanism model of steam explosion pretreatment

4　结　论

通过对蒸汽爆破后玉米秸秆理化特性多尺度的初步分析，表明蒸汽爆破对木质纤维素类物质的理化特性改变具有显著作用，得出以下结论。

(1) TGA 分析结果表明，SECS 的热解区域比 CS 具有更宽的温度范围，其最大热分解速率的温度 $T_{\max} = 336.3$ ℃，最大失重微商为 9.474%/min 分别比对照高 18 ℃和 34.57%。

(2) FTIR 分析结果表明，蒸汽爆破前后木质纤维素官能团所对应的特征峰吸收强度有明显差异，表明蒸汽爆破对玉米秸秆的化学组成与结构有显著影响。

(3) XRD 分析结果表明，蒸汽爆破预处理对降低纤维素的结晶度有明显效果，结晶度下降 14.57%，同时结晶区的平均晶粒尺寸减少 38.03%，微观应力改变量为 100.20%。

(4) SEM 分析结果表明，蒸汽爆破预处理破坏了生物质的细胞层次结构，降低了纤维素和半纤维素的聚合度，基于以上分析构建了蒸汽爆破过程的机理模型。

References:

[1] Howard G. Energy Revolution:Policies for a Sustainable Future [M]. Translated by Liu X F,et al. Beijing:China Environmental Science Press,2006:6-8. (in Chinese)
霍华德·格尔勒. 能源革命——通向可持续未来的政策 [M]. 刘显法,等译. 北京:中国环境科学出版社,2006:6-8.

[2] Wang Z Y,Li J F. Report on China Renewable Energy Industry Development 2007 [M]. Beijing:Chemical Industry Press,2008:12-18. (in Chinese)
王仲颖,李俊峰. 中国可再生能源产业发展报告 2007 [M]. 北京: 化学工业出版社,2008:12-18.

[3] Gregg D, Saddler J N. Bioconversion of lignocellulosic residue toethanol: Process flowsheet development [J]. Biomass and Bioenergy,1995,9(1-5):287-302.

[4] Wu C Z,Zhou Z Q,Yin X L,et al. Current status of biomass energy development in China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(1):91-97. (in Chinese)
吴创之,周肇秋,阴秀丽,等. 我国生物质能源发展现状与思 [J]. 农业机械学报,2009,40(1):91-97.

[5] Wang K,Jiang J X,Song X L. Research progress on the steam explosion pretreatment of the lignocellulose and its bioconversion [J]. Boimass Chemical Engineering,2006,40(6):37-40. (in Chinese)
王　堃,蒋建新,宋先亮. 蒸汽爆破预处理木质纤维素及其生物转化研究进展 [J]. 生物质化学工程,2006,40(6):37-40.

[6] Kaar W E,Gutierrez C V. Steam explosion of sugarcane bagasse as a pretreatment for conversion to ethanol [J]. Biomass and Bioenergy,1998,14(3):277-287.

[7] Öhgren K,Rudolf A,Galbe M. Fuel ethanol production from steam-pretreated corn stover using SSF at higher dry matter content [J]. Biomass and Bioenergy,2006,30(10):863-869.

[8] Chen H Z,Liu L Y. Technology of Steam Explosion:Principle and Application [M]. Beijing:Chemical Industry Press,2007:3-6. (in Chinese)
陈洪章,刘丽英. 蒸汽破碎技术原理及应用 [M]. 北京:化学工业出版社,2007: 3-6.

[9] Yuan Y T,Chen H Z. Application of steam explosion in ephedrine extraction [J]. Journal of China Pharmaceutical University,2005,36(5):414-416. (in Chinese)
原义涛,陈洪章. 蒸汽爆破技术在麻黄碱提取中的应用 [J]. 中国药科大学学报,2005,36(5):414-416.

[10] Wang X T,Zhang B L,Song A D,et al. Application of steam-exploded technology to anaerobic digestion of corn stover [J]. Transactions of the CSAE,2008,24(8):189-192. (in Chinese)
王许涛,张百良,宋安东,等. 蒸汽爆破技术在秸秆厌氧发酵中的应用 [J]. 农业工程学报,2008,24(8):189-192.

[11] Yang Q,Wu S B. Thermogravimetric properties and kinetic analysis of wheat straw [J]. Transactions of the CSAE,2009,25(3):193-197. (in Chinese)
杨　卿,武书彬. 麦草的热失重特性及动力学 [J]. 农业工程学报,2009,25(3):193-197.

[12] Wu H L,Liu R H,Deng C J. Properties and fourier transform infrared spectrum analysis on bio-oil from fast pyrolysis of poplar sawdust [J]. Transactions ofthe CSAE,2009,25(6):219-223. (in Chinese)
吴汉靓, 刘荣厚,邓春健. 木屑快速热裂解生物油特性及其红外光谱分析 [J]. 农业工程学报,2009,25(6):219-223.

[13] Deng Q Y,Liu L,Deng H M. Spectrum Analysis Tutorial [M]. Beijing:Science Press,2007:42-80. (in Chinese)
邓芹英,刘　岚,邓慧敏. 波谱分析教程 [M]. 北京:科学出版社,2007:42-80.

[14] Yu C T,Chen W H,Men L C,et al. Microscopic structure features changes of rice straw treated by boiled acid solution [J]. Industrial Crops and Products,2009:29(2-3):308-315.

[15] Du H Q,Wang J,Bai X F. Study on pyrolysis process of lignocellulosic biomass by thermogravimetric analysis [J]. Journal of Naturalscience of Heilongjiang University,2008,25(1):85-92. (in Chinese)
杜海清,王　晶,白雪峰. 木质类生物质热解过程的热重分析研究 [J]. 黑龙江大学自然科学学报,2008,25(1):85-92.

[16] Song C C,Hu H Q. Catalytic pyrolysis and kinetics of agricultural stalks and their main components [J]. Col Conversion,2003,26(3):91-96. (in Chinese)
宋春财,胡浩权. 秸秆及其主要组分的催化热解及动力学研究 [J]. 煤炭转化,2003,26(3):91-96.

[17] Li R Q. Spectrum Analysis of Organic Structures [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2003: 55-56. (in Chinese)
李润卿. 有机结构波谱分析 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2003: 55-56.

[18] Li J. Wood Spectroscopy [M]. Beijing: Science Press, 2003: 21-28. (in Chinese)
李 坚. 木材波谱学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 21-28.

[19] Chen G F, Wu Y M. Plant Fiber Chemistry [M]. Beijing: Light Industry Press, 1980: 66-72. (in Chinese)
陈国符, 邬义明. 植物纤维化学 [M]. 北京: 轻工业出版社, 1980: 66-72.

[20] Li J H, Yang S G, Zheng Z, et al. Effect of anaerobic fermentation of spartina alterniflora under mesophilic conditions on the changes of lignocellulosic struture [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 199-203. (in Chinese)
李继红, 杨世关, 郑 正, 等. 互花米草中温厌氧发酵木质纤维结构的变化 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 199-203.

[21] Roncero M B, Tortes A L. TCF bleaching of wheat straw pulp using ozobe and xylanase [J]. Bioresource Technology, 2003, 87(3): 305-314.

[22] He X L. Botany [M]. Beijing: Science Press, 2008: 12-14. (in Chinese)
贺学礼. 植物学 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 12-14.

[23] He T X. Ultrastructure of Wood Cell Wall [M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 1987: 10-15. (in Chinese)
何天相. 木材细胞壁超微结构 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1987: 10-15.

[24] Chen J N. Principles of Transport Process [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 48-50. (in Chinese)
陈晋南. 传递过程原理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 48-50.

[25] Oliva J M, Sáez F, Ballesteros I, et al. Effect of lignocellulosic degradation compounds from steam explosion pretreatment on ethanol fermentation by thermotolerant yeast kluyveromyces marxianus [J]. Appl Biochem Biotech, 2003, 105(1-3): 141-153.

Influence of Steam Explosion on Physical-Chemical Characteristic of Corn Stalk

REN Tian-Bao[1,2], XU Gui-Zhuang[2], MA Xiao-Qin[1], YU Zheng-Dao[2], SONG An-Dong[2], ZHANG Bai-Liang[2]

(1. *Henan Institute of Science and Technolgy, Xinxiang* 453003, *China*;
2. *Key Laboratory of Renewable Energy of Ministry of Agriculture, Zhengzhou* 450002, *China*)

Abstract: In the research fields of lignocellulosic materials, the physical-chemical properties are an important foundation for the resource conversion. Employing thermal gravimetric analysis, Fourier transform infrared spectroscopy, X-ray diffraction and scanning electron microscopy methods, physical-chemical properties changes of steam exploded corn stalk were studied. The results of analysis showed that pyrolysis region of steam exploded corn stalk had a wider temperature range compared with the control substance, during which the maximum self-heating rate increased significantly and activation energies (E) decreased by 16.25%. The characteristic peak absorption intensity was significantly different. The hierarchical structure of the cell wall was completely destroyed, and crystallinity of lignocellulose decreased by 14.57%. Based on this analysis, a mechanism model of steam explosion pretreatment was constructed. The results indicate that physical-chemical properties of corn stalk are significantly affected by steam explosion pretreatment.

Key words: steam explosion; corn stalk; physical-chemical properties; mechanistic mode