玉米秸秆微晶纤维素的制备及其性质

张冬丽[1]，程 力[*1,2]，顾正彪[1,2,3]，洪 雁[1,2,3]，李兆丰[1,2,3]
（1. 江南大学 食品学院，江苏 无锡 214122；2. 食品科学与技术国家重点实验室，江苏 无锡 214122；
3. 江南大学 食品安全与营养协同创新中心，江苏 无锡 214122）

摘要：以玉米秸秆为原料，研究其提取制备微晶纤维素的工艺及产品性能。探讨酸解温度、硫酸体积分数、酸解时间对微晶纤维素聚合度及得率的影响，并对微晶纤维素的理化性质进行了分析。结果表明：玉米秸秆微晶纤维素最佳制备工艺条件为：反应温度 85 ℃，硫酸体积分数 8%，水解时间 90 min，此时制得微晶纤维素聚合度为 292，纯度 92.6%，得率 76.48%，结晶度为 74.5%。在此条件下，玉米秸秆微晶纤维素在保留形态结构的同时具有较高的结晶度和热稳定性，具备较好的应用性能和价值。

关键词：玉米秸秆；微晶纤维素；聚合度
中图分类号：TS 201.2；S 39　**文献标志码**：A　**文章编号**：1673—1689(2016)010—1113—07

Preparation and Properities of Microcrystalline Cellulose from Corn Stalk

ZHANG DongLi[1]，*CHENG Li*[2]，*GU Zhengbiao*[1,2,3]，*HONG Yan*[1,2,3]，*LI Zhaofeng*[1,2,3]
（1. School of Food Science and Technology，Jiangnan University，Wuxi 214122，China；2. The State Key Laboratory of Food Science and Technology，Wuxi 214122，China；3. Synergetic Innovation Center of Food Safety and Nutrition，Jiangnan University，Wuxi 214122，China）

Abstract：Corn stalk was used to prepare microcrystalline cellulose （MCC） and product properties were studied. The optimal parameters for MCC preparation were founded to be 8% （w/w） of H_2SO_4，hydrolyzing time 90 min and temperature 85 ℃，which resulted in a polymerization degree of 292，a content of 92.6% ，a yield of 76.48% and a crystallinity of 74.5% for cellulose. Under these conditions，MCC retained the original morphological structure with high crystallinity and thermal stability，thus possessing favorable properties for future use.

Keywords：corn stalk，microcrystalline cellulose，degree of polymerization

微晶纤维素（Microcrystalline cellulose，MCC）是天然纤维素经稀酸水解至极限聚合度（LODP）的产物[1]。因其聚合度低、吸水性强等特性，具备许多类似的聚合物材料无法媲美的功能。微晶纤维素作为乳化剂、稳定剂、持水剂等被广泛用于化妆品、食品、制药行业[2]。近年来，微晶纤维素作为一种多功能性纤维素材料成为了新的研究热点。

目前，国内外主要以木材和短绒棉为原料制备微晶纤维素，但其存在成本较高、原材料供应不足的缺陷。随着对全球可持续发展的日益关注，人们逐渐把目光转向其它木质纤维素原料，尤其是农作物废弃物方面，已有报道从菠萝叶[3]、稻草[4]、蔗渣[4]、

收稿日期：2015-03-10

* **通信作者**：程 力（1982—），男，江苏如皋人，工程师，主要从事淀粉深加工研究。E-mail：chenglichocolate@163.com

薯渣[5]、大豆皮[6]等制备出微晶纤维素。而针对玉米秸秆微晶纤维素的制备却鲜有报道。

我国每年产生的玉米秸秆可达 2.2 亿 t,居农业固体废弃物首位，但是对玉米秸秆利用率较低,造成极大的资源浪费[7]。玉米秸秆中纤维素含量高达 30%~40%，若能将这部分纤维素成分加以精制,获得高纯度、高结晶度的纤维素,实现玉米秸秆资源的高附加值利用,将创造很大的经济效益。与木材相比,秸秆的生物结构具有不均一性,各部分的化学成分及纤维形态差异很大。作者采用碱法提取纤维素,利用亚氯酸钠漂白,进一步稀酸水解获得一定 DP 值的玉米秸秆 MCC,并对其主要性能进行分析,为玉米秸秆的综合利用奠定了理论基础。

1 实验器材

1.1 材料与试剂

玉米秸秆粉,山东诸城兴贸玉米开发有限公司提供;亚氯酸钠,上海晶纯试剂有限公司产品;铜乙二胺溶液,中国制浆造纸研究院提供;其它试剂为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

乌氏粘度计,中国医药(集团)上海化学试剂公司经销;D8 ADVANCE 粉末 X-衍射仪,德国 Bruker 公司制造；日立 S-4800 型场发射扫描电子显微镜,日本 HITACHI 集团制造;Nicolet Nexus 470 型红外光谱仪，美国 Thermo Electron 公司制造;S3500 型激光粒度仪，美国 Microtrac 公司制造;TGA/SDTA851e热重分析仪，梅特勒-托利多仪器有限公司制造。

2 实验方法

2.1 玉米秸秆主要化学成分测定

纤维素,高效液相色谱法[8];半纤维素,高效液相色谱法[8];木素,高效液相色谱法[8];灰分,NREL 分析方法[8]。

2.2 玉米秸秆微晶纤维素(MCC)的制备

2.2.1 纤维素提取 称取一定质量的玉米秸秆粉末(100 g)与 40 g/L 的 NaOH(2 000 mL)混合,80 ℃搅拌反应 2 h,抽滤洗涤至中性。滤渣中加入 1.7 mg/L 的亚氯酸钠溶液,醋酸调节 pH 为 4,80 ℃处理 2 h,洗涤过滤,60 ℃干燥粉碎得到玉米秸秆纤维素。

2.2.2 MCC 制备 玉米秸秆纤维素硫酸按料液比 1:20(g/mL)进行酸解反应,抽滤洗涤,60 ℃真空干燥 24 h 得到玉米秸秆微晶纤维素。酸体积分数分别为 6%、7%、8%、9%、10%，酸解时间分别为 30、60、90、120、90 min，酸解温度分别为 70、75、80、85、90 ℃。

2.3 MCC 聚合度测定

采用铜乙二胺-乌氏粘度计法测定 MCC 聚合度[9-10]。计算公式为

$$D_p^{\alpha}=K[\eta] \quad (1)$$

式(1)中:K 为比例常数; α 为与分子形状有关的经验常数;D_p 为聚合度;η 为特性黏度(mL/g)。

在 25 ℃时,对于纤维素-铜乙二胺溶液体系,K 为 0.75,α 为 0.905。

2.4 MCC 含量的测定

参照李国成，刘春霞等微晶纤维素含量测定方法[11]。

2.5 扫描电镜分析

将样品制成切片，在溅射涂膜机上喷涂 10 nm 厚的金,然后在日立 S-4800 型场发射扫描电子显微镜下对微晶纤维素的形态进行分析。

2.6 傅立叶红外分析

测试前，样品在 60 ℃下干燥 12 h。将 1~3 mg 纤维素样品与 100~300 mg 溴化钾粉末混合均匀,压制成厚度 1 mm 左右的透明片。利用 Nicolet Nexus 470 型 FT-IR 光谱仪,波束范围 400~4 000 cm^{-1},扫描次数为 100,分辨率 2 cm^{-1}。

2.7 X-射线分析

采用 D8 ADVANCE 粉末 X-衍射仪,Cu、Kα 射线,管压为 40 kV,扫描角度 10~40°,扫描速度为 4°/min。材料的结晶度按如下方程计算[12]。

$$C=(I_{002}-I_{am})/I_{002}\times 100\% \quad (2)$$

式(2)中:I_{002} 为最大吸收峰强度;I_{am} 为 2θ=18°时吸收峰峰强度,代表无定形区。

2.8 热性能分析

采用梅特勒-托利多仪器有限公司 TGA/SDTA851e 热重分析仪对样品的热稳定性进行分析,测试条件为 N_2 氛围,温度范围 30~700 ℃,升温速度 10°/min。

3 结果与分析

3.1 玉米秸秆主要化学成分分析

玉米秸秆中的化学组成对于玉米秸秆的综合

利用研究至关重要,玉米秸秆中主要化学成分如表1所示。可以看出,玉米秸秆中主要成分为纤维素、半纤维素和木素。其中,纤维素质量分数高达34.11%。与其他农作物废弃物如稻草相比,玉米秸秆中灰分含量少,木素含量较低,因此玉米秸秆可以作为微晶纤维素的制备原料。

表1 玉米秸秆主要化学成分

Table 1 Chemical composition of corn stock

成分	质量分数/%
纤维素	34.11
半纤维素	26.78
酸不溶木素	16
灰分	6

3.2 工艺条件对MCC聚合度和得率的影响

3.2.1 *硫酸体积分数对MCC聚合度和得率的影响* 选取酸解时间为60 min、酸解温度80 ℃,考察不同酸体积分数对微晶纤维素聚合度和得率(以玉米秸秆为原料提取的纤维素为基准)的影响,结果如图1所示。可以看出,随着酸体积分数的增加,微晶纤维素的聚合度逐渐减小。这是因为在酸的作用下,β-1,4-糖苷键断裂,逐渐被水解成小分子;酸体积分数越大,水解速度越快,不断产生新的还原末端,使微晶纤维素的得率和聚合度降低[13]。但酸体积分数对MCC的得率影响很小,在6%~12%酸体积分数内,MCC得率基本稳定于76%~78%之间。当酸体积分数为8%时,聚合度趋于稳定,综合考虑MCC得率、聚合度和生产成本,选择酸体积分数为8%。

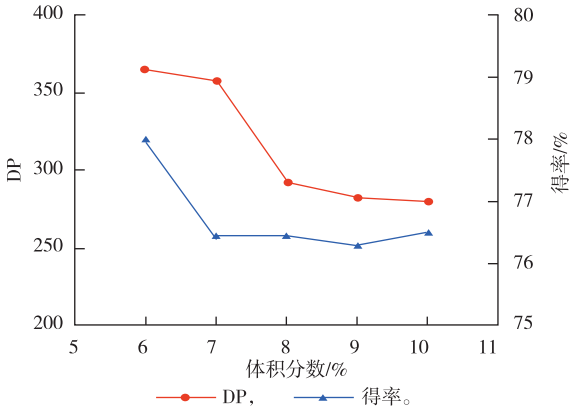


图1 酸体积分数对MCC得率及聚合度的影响

Fig. 1 Effect of acid concentration on MCC yield and DP

3.2.2 *酸解时间对MCC聚合度和得率的影响* 选取酸体积分数为8%、酸解温度为80 ℃,考察不同酸解时间对微晶纤维素聚合度和得率的影响,结果如图2所示。可以看出,随着酸解时间的延长,玉米秸秆MCC得率和聚合度均下降。这是因为随着反应时间的延长,纤维素分子糖苷键断裂增多,继续增加时间导致更多的纤维素水解成葡萄糖,进而使得率下降。故选择合适的酸解时间为60 min。

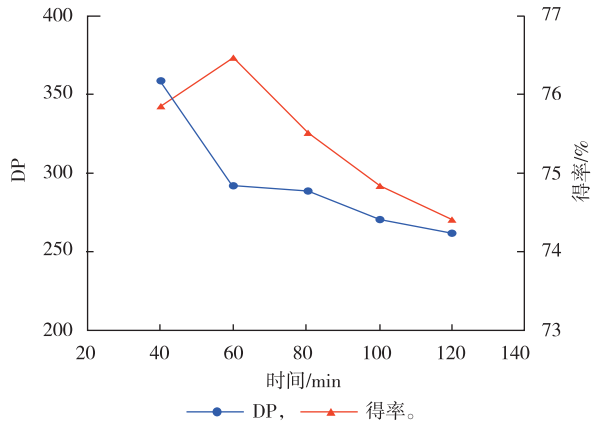


图2 酸解时间对MCC得率及聚合度的影响

Fig. 2 Effect of hydrolysis time on MCC yield and DP

3.2.3 *酸解温度对微晶纤维素聚合度和得率的影响* 选取酸体积分数为8%,酸解时间为60 min,考察不同酸解温度对微晶纤维素聚合度和得率的影响,结果如图3所示。可以看出,随着酸解温度的增加,增强了糖苷键断裂的活化能,促进纤维素分子糖苷键的断裂,使微晶纤维素的聚合度减小,得率不断升高;当温度高于85 ℃,高温导致小的纤维素片段降解为小分子糖,从而降低得率。综合考虑,选择合适的酸解温度为85 ℃。

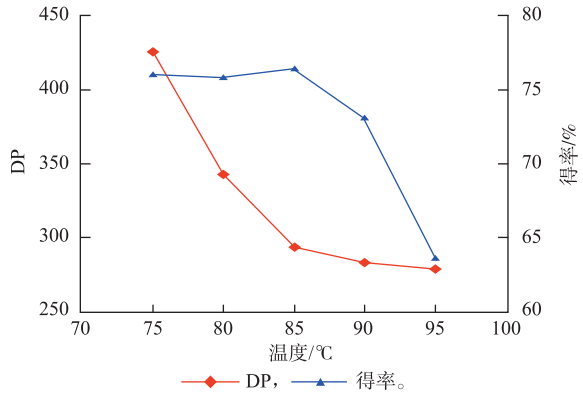


图3 酸解温度对MCC得率和聚合度的影响

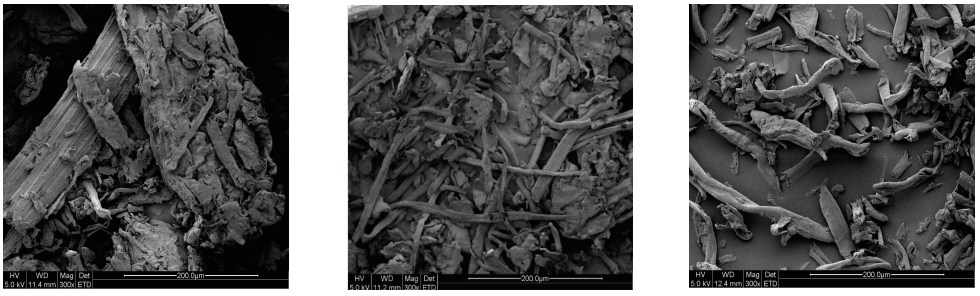
Fig. 3 Effect of hydrolysis temperature on MCC yield and DP

单因素实验得到玉米秸秆微晶纤维素最佳的

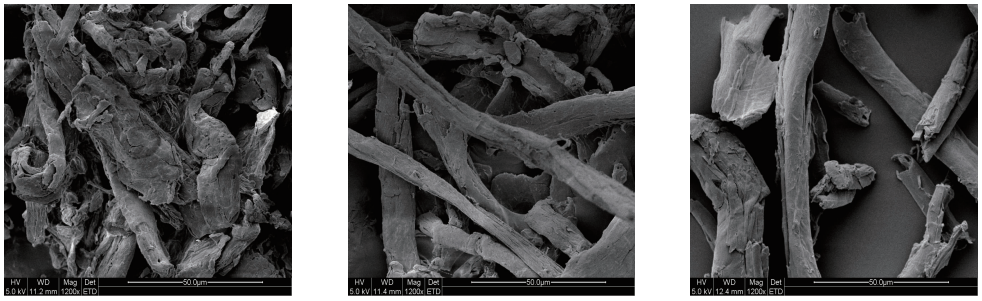
制备条件为:硫酸体积分数 8%、水解温度 85 ℃、水解时间 60 min,在此条件下制备的微晶纤维素聚合度为 292,得率 76.48%。在相同液比和反应时间下,Wang Dan[14]以红麻韧皮为原料,105 ℃反应得到红麻韧皮 MCC 聚合度为 310,得率 77%。可见,本实验采取的制备方法与文献报道值具有可比较性,且反应条件更加温和。

3.3 MCC 的理化性质分析

3.3.1 扫描电镜分析 市售棉浆微晶纤维素和玉米秸秆微晶纤维素的扫描电镜图片如图 4 所示。从图 4(A)中可以看出,玉米秸秆纤维素呈束状结构,经过碱处理和亚氯酸钠漂白脱除木素和半纤维素后,纤维表面出现一定程度的剥离现象,木质纤维素致密的结构发生解聚,从而更有利于化学试剂的渗透[15],见图 4(a);进一步酸解处理使纤维素降解成长棒状结构,见图 4(b)。从图 4(B)(b)和图 4(C)(c)看出,两种微晶纤维素都呈现出棒状结构,但市售棉浆微晶纤维素短粗棒状,表面较光滑,玉米秸秆 MCC 细长棒状,酸解不均匀导致仍有部分纤维素团聚。此外玉米秸秆纤维素在酸解时表面出现了轻微的裂纹,这可能是由于样品在亚氯酸钠漂白处理过程中纤维素部分降解导致[13]。



(A)玉米秸杆纤维素SEM放大300倍 (B)玉米秸秆微晶纤维素SEM放大300倍 (C)市售棉浆微晶纤维素SEM放大300倍



(a)玉米秸杆纤维素SEM放大1 200倍 (b)玉米秸秆微晶纤维素SEM放大1 200倍 (c)市售棉浆微晶纤维素SEM放大1 200倍

图 4 纤维素扫描电镜图

Fig. 4 SEM of cellulose

3.3.2 粒径分析 粒径的大小及其分布是微晶纤维素的重要的物理性质之一。由图 5 可以看出,酸解处理后,玉米秸秆微晶纤维素颗粒大小达到微米级,粒径分布在 7.78~418 μm 之间,与市售 MCC 粒径分布基本一致,但前者具有更小的粒度。其中玉米秸秆 MCC 中位粒径是 29.53 μm,市售 MCC 中位粒径是 42.44 μm,相比于市售微晶纤维素,玉米秸秆 MCC 粒度更小,表面暴露更多的羟基,在改性和应用上更具优势。

3.3.3 红外分析 玉米秸秆纤维素、玉米秸秆 MCC、市售 MCC 的红外光谱分析如图 6 所示。从图可以看出,玉米秸秆纤维素经稀酸水解后结构没有明显变化。对玉米秸秆纤维,在 1 566 cm^{-1} 处存在较弱的吸收峰,说明存在少量的半纤维素仍未除尽,在稀酸作用下,该吸收峰消失,制备得到的微晶纤维素纯度提高。玉米秸秆 MCC 与市售 MCC 化学结构相似,其中在 3 357 cm^{-1} 为纤维素羟基的伸展运动,2 900 cm^{-1} 为C—H 伸缩振动。两种样品中,1 640 cm^{-1} 处均观察到明显的吸收峰,是纤维素吸水导致[16]。897 cm^{-1} 处可看到纤维素中 β-链接产生的平面外伸缩振动,同时也与纤维素中非结晶成分有关,由此处吸收峰强度可知,玉米秸秆 MCC 结晶度稍低于市售棉浆MCC。此外,在市售 MCC 红外光谱中,1 120 cm^{-1} 可以观察到纤维素中 β-1,4-糖苷

键链接中 C—O—C 伸缩振动,这是由于少量非纤维成分的存在,玉米秸秆 MCC 此处的吸收峰并不明显。

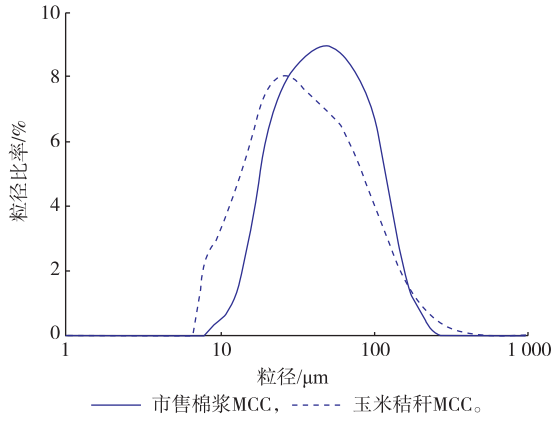
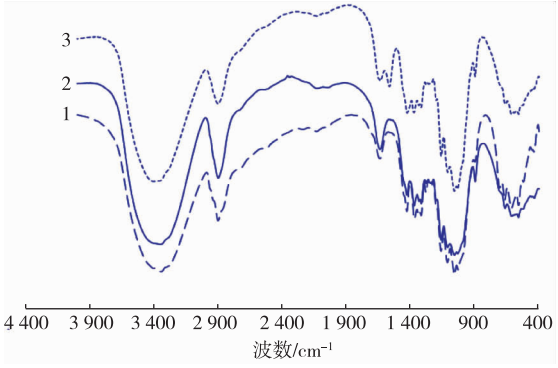


图 5 微晶纤维素的粒径分布

Fig. 5 Distribution of particle size of microcrystalline cellulose

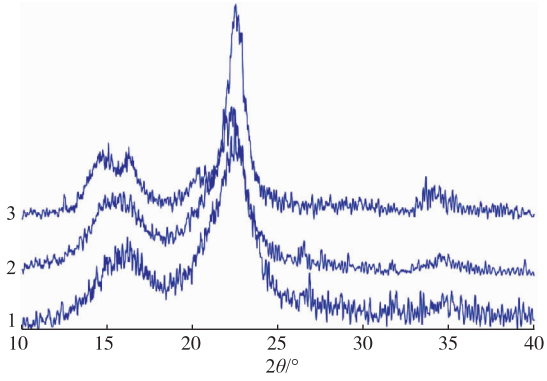


注:1. 玉米秸秆纤维素, 2. 玉米秸秆微晶纤维素, 3. 市售棉浆微晶纤维素。

图 6 纤维素红外光谱图

Fig. 6 FTIR of cellulose

3.3.4 X-射线衍射分析 由图 7 可以看出,玉米秸秆纤维素稀酸水解后结晶结构没有发生变化,在 2θ 为 15、22.4、34 °附近均存在明显的吸收峰,保持了天然的 cellulose-I 型结构。玉米秸秆 MCC 与市售 MCC 图谱基本一致, 对于市售棉浆微晶纤维素,在 2θ 为 14、16、22.4 °可以看到明显的吸收峰,分别对应 110、$\bar{1}$10 和 002 晶面[17]。两者的结晶度分别为:市售棉浆 MCC 89%,玉米秸秆 MCC 74.5%。玉米秸秆 MCC 结晶度较低,这与原料种类及预处理过程存在较大关系。此外,禾本科植物纤维素以外的杂成分含量较高,蒸煮较困难,存在少量的半纤维素未被除尽,导致结晶度略低。

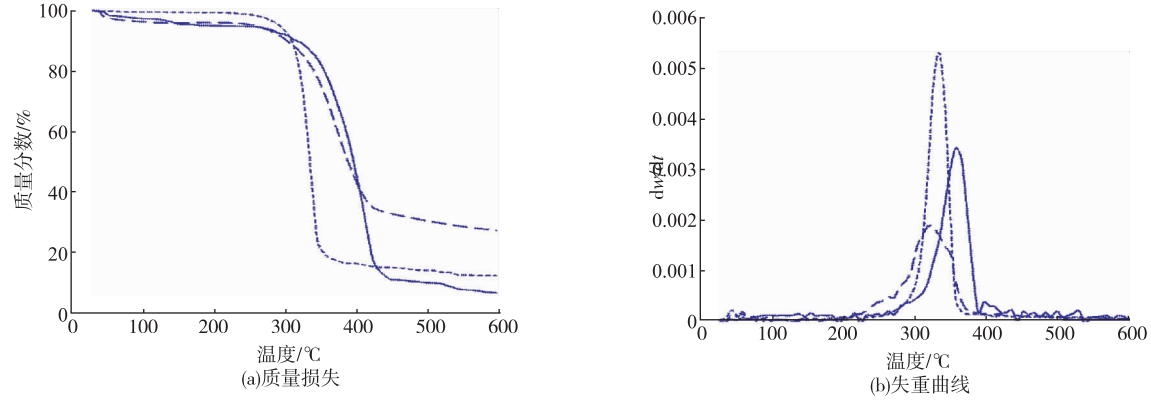


注:1. 玉米秸秆纤维素, 2. 玉米秸秆微晶纤维素, 3. 市售棉浆微晶纤维素。

图 7 纤维素 XRD 图谱

Fig. 7 XRD of cellulose

3.3.5 微晶纤维素的热降解特性分析 见图 8。随着温度的升高, 不同纤维素的质量损失如图 8(a)所示。



注:1. 玉米秸秆纤维素, 2. 玉米秸秆微晶纤维素, 3. 市售棉浆微晶纤维素。

图 8 纤维素的热重曲线

Fig. 8 Thermogravimetric curves of cellulose

从图中可以看出,纤维素的热降解主要分3步进行。起始质量损失,主要是由于水分蒸发导致,取决于纤维的水分质量分数。第二次热降解出现在200~310 ℃,主要是半纤维素和木素的降解。最后降解阶段在310~500 ℃,在此温度范围内,几乎所有的纤维素成分都降解。玉米秸秆纤维素经稀酸处理后,热稳定性明显提高,起始降解温度及最大降解温度都增加了30~40 ℃。木质纤维素的热稳定性与非纤维成分含量、纤维素之间的结合力及结晶结构有关[18]。在500 ℃时,玉米秸秆纤维素残余固形物含量较高,可能是由于其中含有较高的灰分和少量难降解的木素成分,由此也证明酸解对纤维素起到了一定的纯化作用,使玉米秸秆MCC结晶度增大,刚性结构更加明显,从而提高了热稳定性。由图8(b)可以看出,玉米秸秆MCC与市售MCC失重曲线相差不大,由于制备方法及纤维素纯度的差异,玉米秸秆MCC热失重范围较宽,市售棉浆MCC热稳定性相对较高。在传统的聚合物加工温度范围内,即低于200 ℃时,两者均没有表现出明显的降解特性,因此玉米秸秆MCC可以作为复合物中有效的填料。

4 结 语

通过碱处理及酸性亚氯酸钠处理脱除玉米秸秆中的半纤维素和木素,通过酸解将其转化为一种高附加值微晶纤维素产品。通过工艺优化得到最佳的工艺条件为:酸解温度85 ℃,酸解时间60 min,硫酸体积分数8%,此时MCC得率为76.48%。通过对玉米秸秆微晶纤维素的理化性质分析发现,其样品中微晶纤维素纯度为92.6%,平均聚合度为292,结晶度为74.5%。制备得到的微晶纤维素在保留原有结构的同时,具有更高的结晶度和热稳定性,与市售棉浆MCC性质相近,作为复合材料的增强相具有较大的应用前景。可见玉米秸秆可以作为一种原料用于制备微晶纤维素,为玉米秸秆的工业化利用提供了新的途径和理论依据,具有巨大的经济效益。

参考文献:

[1] BATTISTA O A, SMITH P A. Microcrystalline cellulose[J]. **Industrial and Engineering Chemistry**,1962,54(5):20-29.

[2] MOHAMAD Haafiz M K,EICHHORN S J,JAWAIDD M,et al. Isolation and characterization of microcrystalline cellulose from oil palm biomass residue[J]. **Carbohydrate Polymers**,2013,93(2):628-634.

[3] RONI Marcos dos Santos,WILSON Pires F N,HUDSON A S,et al. Cellulose nanocrystals from pineapple leaf,a new approach for the reuse of this agro-waste[J]. **Industrial Crops and Products**,2013,50:707-714.

[4] MOHAMED El-Sakhawy,MOHAMMAD L Hassan. Physical and mechanical properties of microcrystalline cellulose prepared from agricultural residues[J]. **Carbohydrate Polymers**,2007,67(10):1-10.

[5] LU H J,GUI Y,ZHENG L H,et al. Morphological,crystalline,thermal and physicochemical properties of cellulose nanocrystals obtained from sweet potato residue[J]. **Food Research International**,2013,50(1):121-128.

[6] UESU N Y,PINEDA E A,HECHENLEITNER A A. Microcrystalline cellulose from soybean husk:effects of solvent treatments on its properties as acetylsalicylic acid carrier[J]. **International Journal of Pharmaceutics**,2000,206(1-2):85-96.

[7] 徐永建,敬玲梅. 玉米秸秆制备微晶纤维素预水解的研究[J]. 黑龙江造纸,2010,38(3):8-10.
XU Yongjian,JING Lingmei. The research of maize straw prehydrolysis [J]. **Heilongjiang Paper**,2010,38 (3):8-10.(in Chinese)

[8] NREL Laboratory Analytical Procedures.[2009-09-01]. http://www.nrel.gov/biomass/analytical_procedures.html

[9] ES ISO 5351-2012,Pulps-Determination of limiting viscosity number in cupriethylenediamine (CED) solution [S]. [S.I.]:ISO,2012.

[10] 高善民,乔青安,许璞,等. 微晶纤维素的制备及性质研究[J]. 功能材料,2007,38(A07):2891-2894.
GAO Shanmin,QIAO Qingan,XU Pu,et al. Preparation and properities of microcrystalline cellulose [J]. **Functional Materials**,2007,38(A07):2891-2894.(in Chinese)

[11] 李国成,刘春霞,余晓霞. 微晶纤维素含量测定[J]. 第三军医大学学报,2009,31(19):1914-1915.
LI Guocheng,LIU Chunxia,YU Xiaoxia. Determination of microstalline cellulose content [J]. **Journal of Third Military Medical University**,2009,31(19):1914-1915.(in Chinese)

[12] HERMANS P H，WEIDINGER A. Quantitative investigation of X-ray diffraction by “amorphous” polymers and some othe r substances[J]. **Journal of Polymer Science**，1950(5)：269-281.(in Chinese)
[13] 袁毅，张黎明，高文远，等. 穿龙薯蓣微晶纤维素的制备及其理化性质研究[J]. 生物质化学工程，2007，41(4)：22-26.
YUAN Yi，ZHANG Liming，GAO Wenyuan，et al. Study on preparation and physicochemical properities of microcrystalline cellulose from dioscorea nipponica makino[J]. **Biomass Chemical Engineering**，2007，41(4)：22-26.(in Chinese)
[14] WANG D，SONG Z Q，SHANG S B，et al. Evaluation of microcrystalline cellulose prepared from kenaf fiber [J]. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**，2010，16(1)：152-156.
[15] JARABO R，MONTE M C，FUENTE E. Corn stalk from agricultural residue used as reinforcement fiber in fiber-cement production[J]. **Industrial Crops and Products**，2013，43：832-839.
[16] MAHA M Ibrahim，WALEED K El-Zawawy，YVONNE Jüttke，et al. Cellulose and microcrystalline cellulose from rice straw and banana plant waste：preparation and characterization[J]. **Cellulose**，2013，20(5)：2403-2416.
[17] PURI V P. Effect of crystallinity and degree of polymerization of cellulose on enzymatic saccharification [J]. **Biotechnology and Bioengineering**，1984，26(10)：1219-1222.
[18] KUNAL Das，DIPA Ray，BYOPADHYAY N R，et al. A study of the mechanical，thermal and morphological properties of microcrystalline cellulose particles prepared from cotton slivers using different acid concentrations [J]. **Cellulose**，2009，16(5)：783-793.

科　技　信　息

陆剑课题组揭示动物 microRNA 成簇分布的进化机制

2016 年 6 月 2 日，国际知名学术期刊《Molecular Biology and Evolution》以长文形式在线发表北京大学生命科学学院生物信息中心陆剑研究组题为 “microRNAs in the same clusters evolve to coordinately regulate functionally related genes”的研究论文。该论文报导了动物中 microRNA 成簇分布的规律和进化特征，并提出了“功能共适应”模型，结合功能基因组学实验数据，揭示了 microRNA 成簇分布的进化驱动机制。

MicroRNA 是一类内源表达的长约 22 碱基的非编码小 RNA，在转录后水平调控靶基因的表达。动物中的 microRNA 通常在基因组中成簇存在。这些 microRNA 簇通常具有非常重要的生物学功能，然而成簇分布背后的进化机理和生物学意义仍然未被解决。陆剑研究组通过比较基因组学分析发现“复制”和“更始产生”是 microRNA 簇产生的重要分子机制，并揭示进化上非常保守的 microRNA 更倾向于成簇形式存在。他们提出了“功能共适应模型”(functional co-adaptation)，解释成簇存在是怎样帮助新产生的 microRNA 在漫长进化过程中存活下来并演化出与该簇中已经存在的 microRNA 相关的生物学功能。该研究从多个角度对这一模型进行验证，发现在人体不同组织中同一 microRNA 簇的成员表达量高度相关并且对靶基因发挥协同抑制作用。通过在人和果蝇细胞中过表达 miR-17~92 簇中不同 microRNA 成员，结合转录组高通量测序分析，进一步验证了该 microRNA 簇各成员之间的功能协同作用，并揭示了这个 microRNA 簇的功能共适应进化过程。通过人类和果蝇的群体基因组学分析，他们发现 microRNA 簇的形成在进化过程中受到较强的正向自然选择作用。该研究揭示了 microRNA 成簇存在的分子机制及进化驱动力量，并对理解新基因和基因组的共进化提供了新思路。

［信息来源］北京大学生命科学学院. 生命科学学院生物信息中心陆剑课题组揭示动物 microRNA 成簇分布的进化机制[EB/OL]. (2016-6-8). http://www.bio.pku.edu.cn/displaynews.php?id=7727