

The Influence of Different Film-Forming Agent on *Calotropis gigantean* Fiber's Performance

Jiangling Luo¹, Tao Zhao^{1,2}, Gang Sun^{3,4}, Yuanyu Ge⁵, Shengzhen Li⁵

¹College of Chemistry, Chemical Engineering and Biotechnology, Donghua University, Shanghai

²Key Laboratory of Science & Technology of Eco-Textile, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai

³Department of Textile, Davis Branch Campus, California University, Davis, CA, USA

⁴Donghua University, Shanghai

⁵Nantong Institute of Fiber Inspection, Nantong Jiangsu

Email: 15021795629@163.com, tzhao@dhu.edu.cn, gysun@ucdavis.edu

Received: Feb. 16th, 2016; accepted: Mar. 4th, 2016; published: Mar. 10th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

Abstract

Calotropis gigantean fiber has a high application value in textile, but this kind of fiber is easily broken. To improve its strength per size and elastic modulus, *Calotropis gigantean* fiber is dealt with starch solution, sodium carboxymethyl starch solution and polyvinyl alcohol solution of different polymerization degrees and then we test its tensile properties of the fiber. According to the testing results, fiber's strength per size and elastic modulus both have an improvement in different degrees. *Calotropis gigantean* fiber has the best treatment effect by PVA. Its strength per size and elastic modulus are improving with polymerization degree of polyvinyl alcohol growing while its breaking extension ratio is opposite. There is a membrane on the surface of fiber. The fiber dealt with PVA has the best effect with a continuous and smooth membrane on the surface of fiber.

Keywords

Calotropis gigantean Fiber, Film-Forming Agent, Tensile Property

不同成膜剂对牛角瓜纤维性能的影响

罗江玲¹, 赵涛^{1,2}, 孙刚^{3,4}, 葛元宇⁵, 李胜臻⁵

¹东华大学化学化工与生物工程学院, 上海

²东华大学生态纺织品重点实验室, 上海

³美国加利福尼亚大学戴维斯分校纺织系, 美国 戴维斯

⁴东华大学, 上海

⁵南通市纤维检验所, 江苏 南通

Email: 15021795629@163.com, tzhao@dhu.edu.cn, gysun@ucdavis.edu

收稿日期: 2016年2月16日; 录用日期: 2016年3月4日; 发布日期: 2016年3月10日

摘 要

牛角瓜纤维具有较高的纺织应用价值, 但是纤维易脆断, 为了改善纤维的断裂比强度和弹性模量, 把淀粉、羧甲基淀粉钠和不同聚合度的PVA溶液处理至牛角瓜纤维纤维表面, 并测试纤维的拉伸性能, 结果发现成膜剂处理之后纤维的断裂比强度和弹性模量均有不同程度的提高, 其中PVA处理之后纤维的断裂比强度、弹性模量和断裂伸长率效果最好, 且纤维的断裂比强度和弹性模量随着PVA聚合度的增加而增大, 纤维的断裂伸长率则相反, 这些成膜处理后纤维表面均能形成一层薄膜, 其中PVA所成的膜连续且光滑, 效果最好。

关键词

牛角瓜纤维, 成膜剂, 拉伸性能

1. 引言

牛角瓜全株具有较高的开发利用价值, 广泛分布于亚洲和非洲的热带和亚热带地区[1] [2], 可做药用、能源植物、纺织原料[3] [4]。国内外研究人员对牛角瓜纤维的结构和性能进行了研究, 如费魏鹤, 胡惠民, 李璇, 李卫东[5]等人对牛角瓜纤维形态、微观结构、结晶结构和热稳定性能进行了研究, Chen 等[6]研究牛角瓜、木棉、棉纤维的化学成分与结构, 并且比较它们的印染特性; 黄惠民[7]利用牛角瓜种毛纤维, 经鞣软处理, 织成的面料具有丝滑爽质感, 有类似全棉的透气性和舒适感, 除此之外黄惠民将牛角瓜纤维应用于无纺布[8], 其所用纤维为毛、丝、麻或者合成纤维, 具有棉的舒适性和透气性, 而且具有天然抑菌的功能; 国内高校研究人员对牛角瓜纤维的染色性能进行了研究, 如东华大学高静[9]等人对直接染料对牛角瓜纤维的染色性能进行了研究; 武汉纺织大学龙丹, 郑小静[10]等人对牛角瓜纤维靛蓝染色性能进行了研究; 国外学者对牛角瓜纤维进行一定的预处理后, 再与棉、涤纶或粘胶纤维进行混纺, 可以改善其纺纱性能[11]。面对棉花资源有限以及消费者越来越看重纺织品的绿色、环保和低碳的性能的局面, 开发出更加经济环保的纺织品以及运用纺织新材料技术, 来满足市场对新型天然纤维素纺织品的需求变得十分必要。

牛角瓜纤维是一种少见的含天然纤维素纤维的纺织原料, 也是现代纺织领域研究最活跃的课题之一。牛角瓜纤维与棉花、丝、麻、毛等天然纤维素纤维不同, 它的表面无转曲, 没有鳞片, 表面光滑, 中空度大, 单位纤维断裂强度低, 在使用梳棉机梳理纤维的过程中, 纤维容易断裂, 成为粉末状的短纤维, 而且纤维与纤维之间缺少抱合力, 纤维难以成网, 采用传统的纺织方法较为困难。本课题从开发新型纤维, 充分利用天然纤维的角度出发, 利用水性聚氨酯、淀粉、PVA 等成膜剂对牛角瓜纤维进行整理, 对牛角瓜纤维进行前处理后, 在细胞水平上基础上, 进行表面膜化处理, 然后进行轴向拉伸性能的研究, 主要包括纤维的断裂比强度、断裂伸长率和弹性模量的测试, 对把握纺织品的最终力学性能, 扩宽牛角瓜纤维在纺织领域的应用具有重要的意义。

2. 实验

2.1. 原料及其仪器

原料：牛角瓜纤维(产地云南)，乙醇(A.R)，去离子水，淀粉(A.R)，羧甲基淀粉钠(任丘市辉达化工有限公司)，聚乙烯醇 1799 (青岛优索化学科技有限公司)，聚乙烯醇 2099 (青岛优索化学科技有限公司)，聚乙烯醇 2499 (青岛优索化学科技有限公司)，聚乙烯醇 2699 (青岛优索化学科技有限公司)。

仪器：Y171 型纤维切断器(常州第二纺织机械有限公司)，ALC-2014 电子分析天平(Sartorius group)，索式提取器，HWS-28 电热恒温水浴锅(上海齐欣科学仪器有限公司)，RE-2000B 旋转蒸发器(上海亚荣生化仪器厂)，SHB-III A 型循环水式多用真空泵(上海豫康科教仪器设备有限公司)，C 型玻璃仪器气流烘干机(上海豫康科教仪器设备有限公司)，101A-1E 电热鼓风干燥箱(上海实验仪器厂有限公司)，SNB-2 数字旋转粘度计(上海精密科学仪器有限公司)，XQ-2 型单纤维强度仪(上海新纤仪器有限公司)，Kruss DSA30 型 KRUSS 德国克吕式光学接触角测试仪(德国 Dataphysics 公司)，JSM-5600LV 型电子显微镜(SEM) (日本 JOL 厂家)。

2.2. 实验方法

2.2.1. 牛角瓜纤维的抽样方法

纤维天生的不均匀性(包括纤维细度、取向度、结晶度、含水率等)，天然纤维素纤维间的性能差异很大，所以使不同牛角瓜中的纤维充分混合均匀，然后再作为样品进行试验，并测试足够多的样品以获得具有价值的数值。

2.2.2. 乙醇前处理牛角瓜纤维

用乙醇做溶剂处理牛角瓜纤维，纤维处理后在烘箱中烘干至恒重后密封备用。

2.2.3. 成膜剂处理牛角瓜纤维

把淀粉、羧甲基淀粉钠和不同聚合度的聚乙烯醇溶液配制成不同浓度的溶液，用浸渍的方法把成膜剂处理至前处理后的牛角瓜纤维上，并在烘箱中烘干至恒重。

2.2.4. 中段称重法测量牛角瓜纤维细度

用中段称重法测试纤维的细度，纤维在标准温湿度环境(20℃，相对湿度 65%)平衡后，将短纤维整理成束，中段切取后，称重、数根数，总共测试 6 束，并按公式(2-1)计算纤维的细度，并对六束纤维进行测量之后，计算平均值：

$$T_t = \frac{10^3 \times G_e}{L_e \times n_e} \quad (2-1)$$

式中： T_t ：线密度(tex)； G_e ：中段纤维重量(mg)； L_e ：中段纤维长度，为 10 mm； n_e ：中段纤维根数。

2.2.5. 牛角瓜纤维拉伸性能的测试

每个变量做六组纤维，然后用 XQ-2 型单纤维强度仪测试纤维的弹性模量、断裂比强度和断裂伸长率，每组纤维测试 50 根，最后各组取平均值得出最终数据。

测试条件：1.0 cN，夹持器模量起点：0，模量终点：1.0%，夹持距离：10 mm

拉伸速度：10 mm/min，强力范围：10 cN~50 cN，伸长范围：10%

1) 纤维的弹性模量

在纺织上，纤维的初始模量是拉伸时伸长率为 1% 时应力的 100 倍，单位为 cN/tex 或者 cN/dtex。

2) 牛角瓜纤维断裂比强度的测试

由于牛角瓜纤维的粗细不匀, 所以采用断裂比强度计算, 按公式(2-2)计算:

$$P_0 = P/D \quad (2-2)$$

式中: P_0 : 断裂比强度, cN/dtex

P : 纤维被拉断时所承受的拉力, cN

D : 纤维的线密度, dtex。

3) 纤维的断裂伸长率

其表示纤维承受最大负荷时的拉伸变形能力, 用 ε_a 表示, 单位为%, 其计算式如(2-3)所示:

$$\varepsilon_a = (L_a - L_0)/L_0 \times 100\% \quad (2-3)$$

式中: ε_a : 断裂伸长率, %

L_a : 试样断裂时的长度, mm

L_0 : 试样原长, mm

2.2.6. 牛角瓜纤维表面结构观察

采用 JSM-5600LV 型电子显微镜(SEM), 将牛角瓜纤维放大若干倍之后进行扫描拍摄, 观察并拍摄牛角瓜纤维表面形态。

3. 实验结果与分析

3.1. 不同聚合度的 PVA 溶液对纤维性能影响的比较

3.1.1. 对纤维断裂比强度和弹性模量的影响

表 1 和表 2 是不同聚合度、不同浓度的聚乙烯醇溶液处理前处理后的牛角瓜纤维后, 纤维的弹性模量和断裂比强度的测试结果, 未处理的牛角瓜纤维的弹性模量和断裂比强度分别是 141.23 cN/dtex 和 2.86 cN/dtex, 成膜处理后的纤维的断裂比强度和弹性模量在 201.76 cN/dtex~2065.42 cN/dtex 和 3.67 cN/dtex~37.25 cN/dtex, 所以成膜剂处理之后纤维的弹性模量和断裂比强度都提高了。并且由表 1 和表 2 中数据作图得到图 1 不同聚合度的聚乙烯醇处理后牛角瓜纤维的弹性模量和图 2 不同聚合度的聚乙烯醇溶液处理后牛角瓜纤维的断裂比强度, 从表中数据和图可以看出, 在聚乙烯醇溶液浓度相同时, 纤维的弹性模量和断裂比强度随着聚乙烯醇聚合度的增大而增大, 这是由于聚乙烯醇聚合度的增大, 纤维的分子量增大, 从而导致聚乙烯醇与牛角瓜纤维之间和聚乙烯醇分子之间的范德华力增大, 聚乙烯醇在牛角瓜纤维表面所形成的薄膜的强力和弹性模量都增大, 从而被处理过的牛角瓜纤维的弹性模量和断裂比强度随着聚乙烯醇聚合度的增大而增大。

Table 1. Comparing the influence of PVA with different polymerization degree on *Calotropis gigantean* fiber's elastic modulus

表 1. 不同聚合度的聚乙烯醇对牛角瓜纤维弹性模量影响的比较

PVA 浓度	1%	3%	5%	10%	15%
PVA 聚合度 1700	201.76	612.60	742.201	947.20	1552.30
PVA 聚合度 2000	262.65	656.31	805.75	998.86	1655.35
PVA 聚合度 2400	306.9	696.25	860.85	1027.53	1789.78
PVA 聚合度 2600	350.76	780.77	956.33	1161.46	2065.42

Table 2. Comparing the influence of PVA with different polymerization degree on *Calotropis gigantean* fiber's strength per size

表 2. 不同聚合度的聚乙烯醇对牛角瓜纤维断裂比强度的影响的比较

PVA 浓度	1%	3%	5%	10%	15%
PVA 聚合度 1700	3.67	11.00	17.68	18.83	31.30
PVA 聚合度 2000	3.79	12.67	18.32	20.76	32.82
PVA 聚合度 2400	4.06	13.68	19.32	21.37	35.02
PVA 聚合度 2600	4.31	14.50	20.35	23.35	37.25

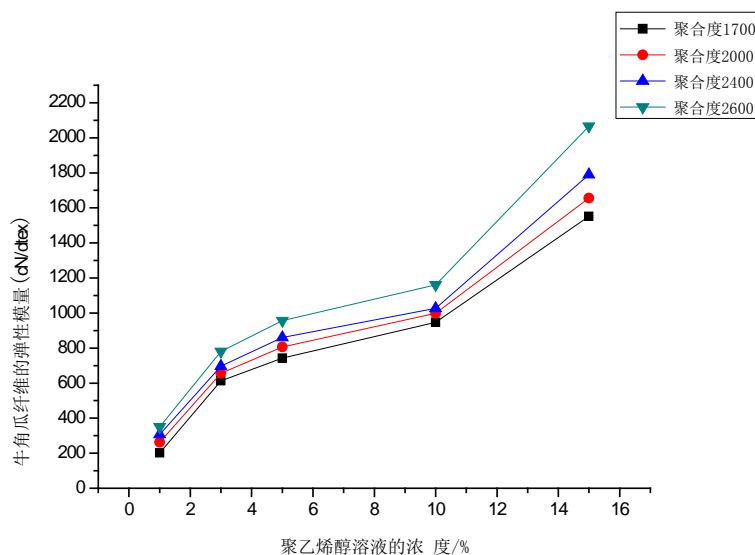


Figure 1. Comparing the influence of PVA solution with different polymerization degree on *Calotropis gigantean* fiber's elastic modulus

图 1. 不同聚合度的聚乙烯醇溶液对牛角瓜纤维弹性模量的影响

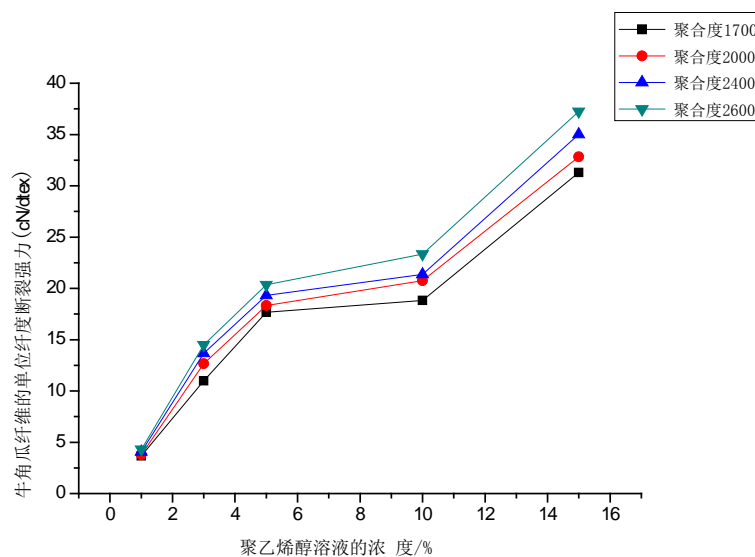


Figure 2. Comparing the influence of PVA solution with different polymerization degree on *Calotropis gigantean* fiber's strength per size

图 2. 不同聚合度的聚乙烯醇溶液对牛角瓜纤维断裂比强度的影响

3.1.2. 对纤维断裂伸长率的影响

表 3 是不同聚合度的聚乙烯醇溶液处理牛角瓜纤维后,牛角瓜纤维断裂伸长率的比较结果,并由表中数据作图 3,可以清楚地看出,不同聚合度的聚乙烯醇溶液处理牛角瓜纤维后,纤维的断裂伸长率的值差别不大,对于相同浓度,不同聚合度的聚乙烯醇溶液处理牛角瓜纤维,纤维的断裂伸长率随着纤维聚合度的增加而降低。原因是随着聚乙烯醇聚合度的增加,聚乙烯醇分子之间的范德华力增大,形成的聚乙烯醇膜的伸长率下降,所以处理至牛角瓜纤维表面之后,当溶液浓度相同时,牛角瓜纤维的断裂伸长率随着聚乙烯醇浓度的增大而减小。

3.2. 不同成膜剂处理对纤维性能的影响

3.2.1. 比较不同成膜剂处理后纤维的断裂比强度和弹性模量

不同成膜剂处理牛角瓜纤维后,由于成膜剂的结构不同,对牛角瓜纤维的力学性能产生不同的影响。表 4,表 5 是不同浓度、不同种类的成膜剂处理牛角瓜纤维后,纤维的弹性模量、纤维断裂比强度的测试结果,未处理的牛角瓜纤维的弹性模量和断裂比强度分别是 141.23 cN/dtex 和 2.86 cN/dtex,成膜处理后的纤维的弹性模量和断裂比强度在 162.21 cN/dtex~1552.30 cN/dtex 和 3.06 cN/dtex~31.30 cN/dtex,成膜剂处理后纤维的弹性模量和断裂比强度都提高了。并由表 4、表 5 中的数据分别作图得出图 4、图 5,由图可知可以明显看出,淀粉溶液、CMS 溶液、PVA1799 溶液处理后的牛角瓜纤维的弹性模量、断裂比强度都是随着溶液浓度的增大而增大。其中 PVA1799 溶液处理后的牛角瓜纤维的弹性模量和断裂比强度均优于其他两种成膜剂,CMS 的处理效果次之,淀粉的处理效果最差。可能的原因是,成膜剂与纤维之间、成膜物质与成膜物质之间依靠分子间的作用力紧密结合在一起,这些作用力包括范德华力、氢键等,就范德华力来说与物质的分子量有关,成膜剂的分子量越大,那么物质之间的范德华力也就越大,三种物质中淀粉和淀粉衍生物羧甲基淀粉钠的分子量在 5~6 万之间,而聚乙烯醇 1799 的分子量大约在 2.5~30 万之间,物质之间的范德华力来说并不能确定成膜剂之间范德华力大小;从氢键作用来说,聚乙烯醇中含有大量的羟基,且其为直链分子结构,所以它在牛角瓜纤维表面成膜后,与牛角瓜纤维之间和聚乙烯

Table 3. Comparing the Influence of PVA with different polymerization degree on *calotropis gigantean* fiber's breaking extension ratio

表 3. 不同聚合度的聚乙烯醇对牛角瓜纤维断裂伸长率的影响的比较

PVA 浓度	1%	3%	5%	10%	15%
PVA 聚合度 1700	1.85	1.90	1.92	2.12	2.24
PVA 聚合度 2000	1.81	1.86	1.88	2.09	2.19
PVA 聚合度 2400	1.78	1.83	1.86	2.04	2.16
PVA 聚合度 2600	1.73	1.76	1.79	2.01	2.14

Table 4. Influence on *Calotropis gigantean* fiber's elastic modulus after dealt with different film-forming agent

表 4. 不同成膜剂处理后对牛角瓜纤维弹性模量的影响

成膜剂浓度(%)	1	3	5	10	15
淀粉	162.21	261.06	397.79	416.43	457.37
CMS	173.84	455.87	463.36	552.01	638.21
PVA1799	201.43	612.60	742.20	947.20	1552.30

Table 5. Influence on *Calotropis gigantean* fiber's strength per size after dealt with different film-forming agent
表 5. 不同成膜剂处理后牛角瓜纤维的断裂比强度测试结果

浓度(%)	1	3	5	10	15
淀粉	3.06	5.42	8.47	10.01	11.41
CMS	3.22	7.89	9.61	13.78	14.25
PVA1799	3.67	11.00	15.68	18.83	31.30

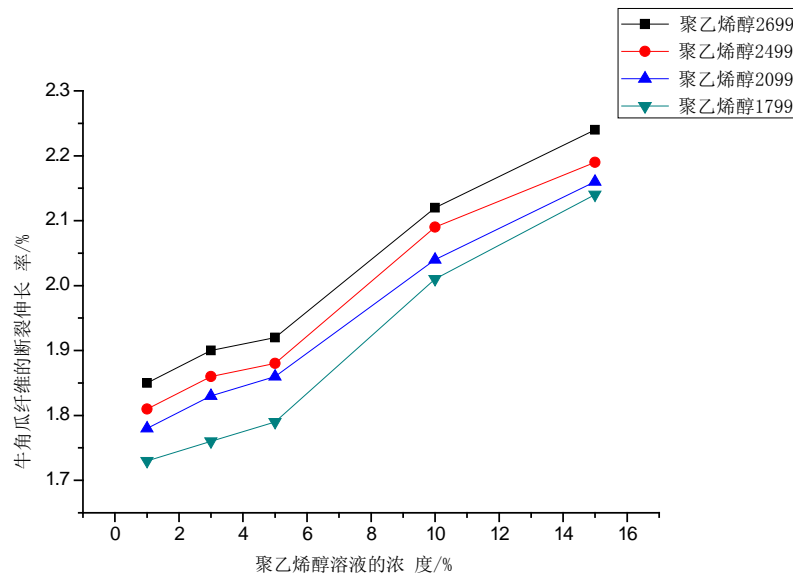


Figure 3. Comparing the influence of PVA with different polymerization degree on *Calotropis gigantean* fiber's breaking extension ratio
图 3. 不同聚合度的聚乙烯醇溶液对牛角瓜纤维的断裂伸长率的影响

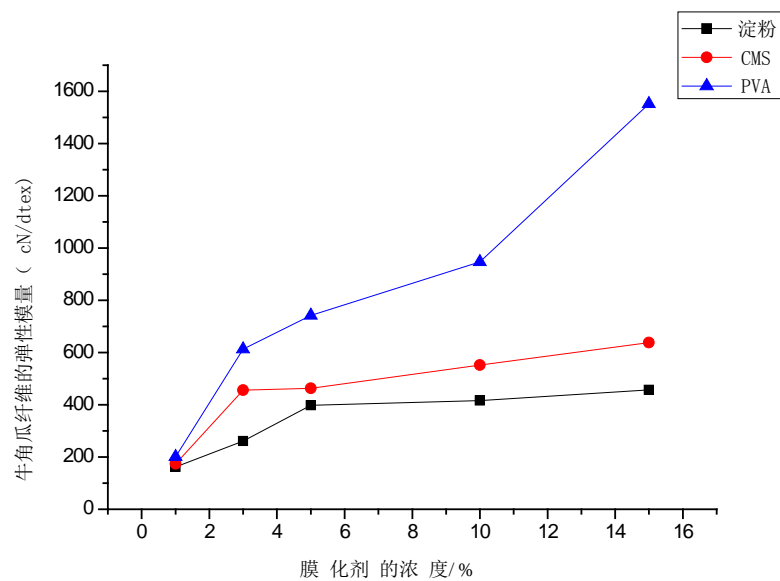


Figure 4. Influence on *Calotropis gigantean* fiber's elastic modulus after dealt with different film-forming agent
图 4. 不同成膜剂处理对牛角瓜纤维弹性模量的影响

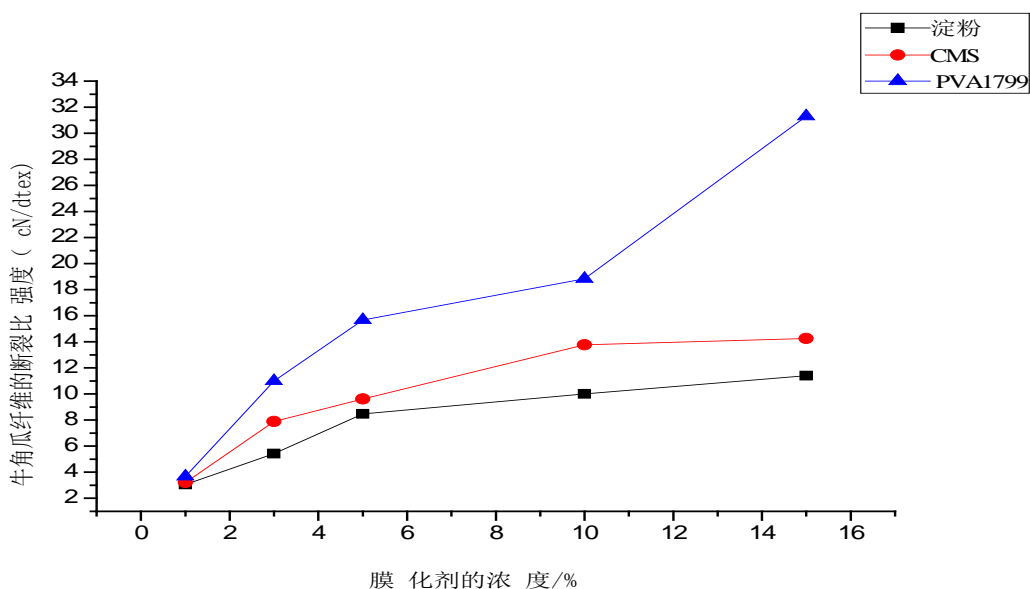


Figure 5. Influence on *Calotropis gigantean* fiber's strength per size after dealt with different film-forming agent

图 5. 不同成膜剂处理对牛角瓜纤维断裂比强度的影响

醇分子之间会形成大量的氢键，而淀粉分子和羧甲基淀粉钠分子虽然也含有较多的羟基，但是结构含有大量的环状结构，因此在成膜剂成膜后分子之间结合的并不如聚乙烯醇紧密，所以在牛角瓜纤维表面成膜后，聚乙烯醇的性能最好，膜的拉伸性能的机械性能最优，其次淀粉和羧甲基淀粉钠具有相似的结构，但是羧甲基淀粉钠中含有更多的能与氢原子形成氢键的氧原子，所以成膜剂在纤维表面成膜后，比较处理后纤维的弹性模量和断裂比强度的处理效果为：PVA1799 > 羧甲基淀粉钠 > 淀粉。

3.2.2. 比较不同成膜剂处理后纤维的断裂伸长率

表 6 是淀粉、羧甲基淀粉钠和聚乙烯醇处理牛角瓜纤维后，牛角瓜纤维的断裂伸长率的比较结果。由表 6 作图 6，不同成膜剂处理后对牛角瓜纤维伸长率的影响。由图 6 可以看出，三种成膜剂处理牛角瓜纤维后，在成膜剂浓度相同时，PVA 处理后纤维的断裂伸长率最大，羧甲基淀粉钠处理后纤维的断裂伸长率次之，淀粉处理后纤维的断裂伸长率最小。

3.2.3. 不同成膜剂在纤维表面的成膜情况

图 7，图 8 和图 9 是不同成膜剂配制成不同浓度的溶液处理后，牛角瓜纤维表面的扫描电镜图。由图 7，图 8 和图 9 可知不同种类的成膜剂处理之后，在低浓度时，它们在牛角瓜纤维表面并不能形成明显的薄膜，随着成膜剂浓度的升高，在纤维表面所成的膜也越来越明显。其中较高浓度的淀粉和羧甲基淀粉钠处理牛角瓜纤维后，在纤维表面所形成的薄膜凹凸不平，而 PVA1799 处理纤维后在纤维表面所形成的薄膜是光滑且连续的，所以比较三种成膜剂处理后纤维的拉伸性能，我们发现在成膜剂溶液浓度相同时，PVA1799 处理后纤维的弹性模量、断裂比强度和断裂伸长率是最佳的。

4. 结论

1) 用不同聚合度的聚乙烯醇溶液处理牛角瓜纤维，聚乙烯醇的醇解度均为 99%，聚合度为 1700、2000、2400、2600，经过实验发现，处理后纤维的弹性模量和断裂比强度都有所提升，在聚乙烯醇浓度相同时，牛角瓜纤维的弹性模量、断裂比强度均随着聚乙烯醇的聚合度的增加而增加，断裂伸长率则相反。

Table 6. Influence on *calotropis gigantean* fiber's breaking extension ratio after dealt with different film-forming agent

表 6. 不同成膜剂处理后牛角瓜纤维的断裂伸长率的测试结果

浓度(%)	1	3	5	10	15
淀粉	1.64	1.75	1.79	2.01	2.14
CMS	1.68	1.77	1.82	2.03	2.24
PVA1799	1.75	1.80	1.86	2.09	2.36

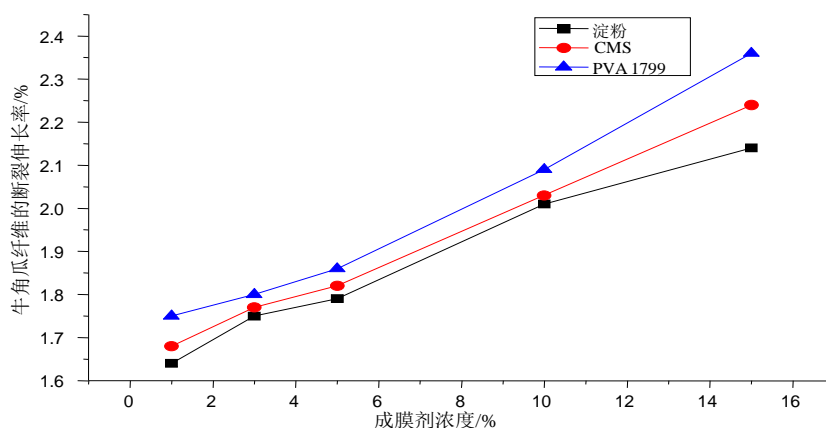


Figure 6. Influence on *Calotropis gigantean* fiber's breaking extension ratio after dealt with different film-forming agent

图 6. 不同成膜剂处理对牛角瓜纤维伸长率的影响

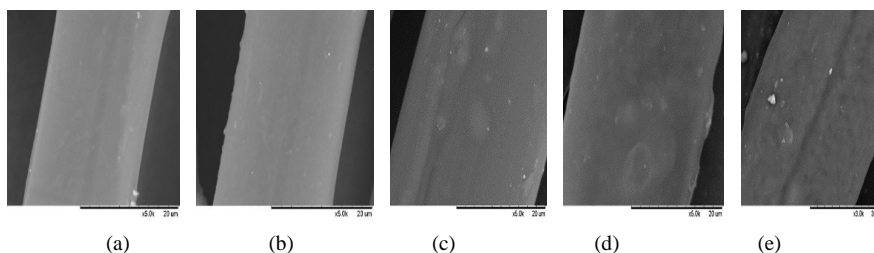


Figure 7. The scanning electron microscopic pictures of *Calotropis gigantean* fiber's surface when dealt with sodium carboxymethyl starch solution; (a) 1% starch; (b) 3% starch; (c) 5% starch; (d) 10% starch; (e) 15% starch

图 7. 淀粉溶液处理后在牛角瓜纤维表面的扫面电镜图：(a) 1% 淀粉溶液；(b) 3% 淀粉溶液；(c) 5% 淀粉溶液；(d) 10% 淀粉溶液；(e) 15% 淀粉溶液

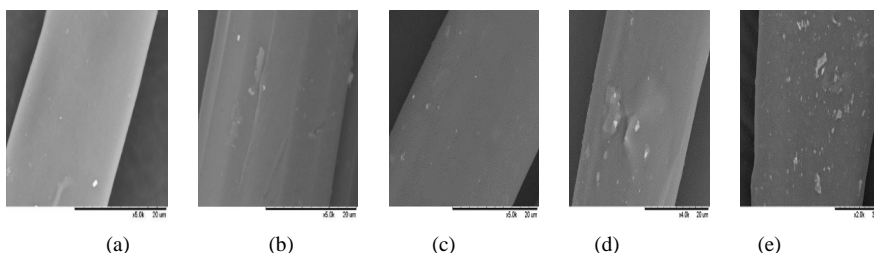


Figure 8. The scanning electron microscopic pictures of *Calotropis gigantean* fiber's surface when dealt with starch solution; (a) 1% CMS; (b) 3% CMS; (c) 5% CMS; (d) 10% CMS; (e) 15% CMS

图 8. 羧甲基淀粉钠溶液处理后在牛角瓜纤维表面的扫面电镜图：(a) CMS 1%；(b) CMS 3%；(c) 5% CMS；(d) CMS 10%；(e) CMS 15%

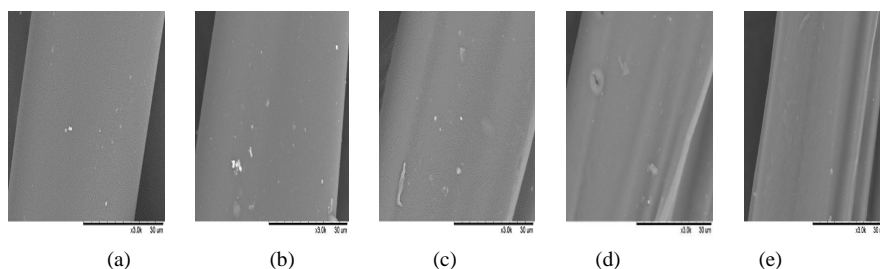


Figure 9. The scanning electron microscopic pictures of *Calotropis gigantea* fiber's surface when dealt with PVA1799 solution; (a) 1% PVA1799; (b) 3% PVA1799; (c) 5% PVA1799; (d) 10% PVA1799; (e) 15% PVA1799

图 9. PVA1799 溶液处理后在牛角瓜纤维表面的扫描电镜图：(a) PVA1799 1%；(b) PVA1799 3%；(c) PVA1799 5%；(d) PVA1799 10%；(e) PVA1799 15%

2) 几种成膜剂处理牛角瓜纤维对其力学性能的影响的比较：

① 比较淀粉溶液、羧甲基淀粉钠溶液、PVA1799 溶液处理后的牛角瓜纤维的力学性能，发现在溶液浓度相同时，用 PVA1799 溶液处理后的牛角瓜纤维的弹性模量、断裂比强度、纤维断裂伸长率最佳，且三种成膜剂处理纤维后，纤维的弹性模量和断裂比强度都有所提升，这三种溶液处理效果排序为：PVA1799 溶液 > 羧甲基淀粉钠溶液 > 淀粉溶液。

② 淀粉溶液、羟甲基淀粉钠溶液、聚乙烯醇溶液处理牛角瓜纤维后，在牛角瓜纤维表面均覆盖有一层薄膜，且溶液浓度相同时，聚乙烯醇溶液处理后，在牛角瓜纤维表面所成的膜是最佳的，所成的膜较为光滑、连续，对提高牛角瓜纤维的力学性能有较大的帮助。

参考文献 (References)

- [1] 戴好富, 王茂媛, 梅文莉, 等. 牛角瓜属植物化学成分与药理活性研究进展[J]. 河南大学学报: 医学版, 2009, 28(1): 1-5.
- [2] Hori, K., Flavier, M.E., Kuga, S., Lam, T.B.T. and Iiyama, K. (2000) Excellent Oil Absorbent Kapok [*Ceiba pentandra* (L.) Gaertn.] Fiber: Fiber Structure, Chemical Characteristic and Application. *Journal of Wood Science*, **46**, 401-404. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00776404>
- [3] 高柱, 王小玲, 马焕成, 等. 干热河谷牛角瓜育苗技术及幼苗生长节律[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2012, 27(4): 503-555.
- [4] 徐海全. 速效绿肥——牛角瓜[J]. 林业科技通讯, 1986(4): 9.
- [5] 费魏鹤, 胡惠民, 李璇, 李卫东. 牛角瓜纤维的结构与性能研究[J]. 纤维·广角, 2011: 80-83.
- [6] Chen, Q., Zhao, T., Wang, M. and Wang, J. (2013) Studies of the Fiber Structure and Dyeing Properties of *Calotropis gigantean*, Kapok and Cotton Fibers. *Coloration Technology*, **129**, 448-453. <http://dx.doi.org/10.1111/cote.12051>
- [7] 黄惠民. 一种纺织用牛角瓜纤维棉条及其加工方法和设备[P]. 中国专利, CN 101565860 A. 2009-10-28.
- [8] 黄惠民, 黄版旒. 牛角瓜纤维无纺布[P]. 中国专利, CN 102071537A. 2011-05-25.
- [9] 高静, 赵涛. 直接染料对牛角瓜纤维的染色性能[J]. 印染助剂, 2012, 29(6): 33-38.
- [10] 龙丹, 郑小静, 余刚, 杜玮, 等. 牛角瓜纤维的靛蓝染色[J]. 印染, 2014(21): 20-26.
- [11] Ashori, A. and Bahreini, Z. (2009) Evaluation of *Calotropis gigantean* as a Promising Raw Material for Fiber-Reinforced Composite. *Journal of composite Materials*, **43**, 1297-1304. <http://dx.doi.org/10.1177/0021998308104526>