

保胶蚕丝形态结构与吸湿性能研究

张 霆¹ 沈 华^{1,2} 徐广标¹

1. 东华大学 纺织学院, 上海 201620;
2. 吴江市鼎盛丝绸有限公司, 江苏 苏州 215228

摘要:保胶蚕丝是保留天然丝胶成分的改性蚕丝。通过扫描电镜(SEM)、傅里叶红外光谱(FTIR)、X射线衍射(XRD)方法,以及练减率、吸湿性能分析,系统评估保胶蚕丝、生丝及熟丝的特性。研究发现,保胶蚕丝横截面呈不规则三角形,纵向光滑但存在一些断裂点;红外光谱分析显示,3种蚕丝纤维特征基团相同,保胶蚕丝纤维与生丝纤维主体结构相同;保胶蚕丝的练减率为1.1%;保胶蚕丝在标准条件(20℃、相对湿度65%)下回潮率达12.67%,吸湿性最好;吸湿动力学表明,3种蚕丝纤维吸湿过程符合准二级动力学模型,保胶蚕丝和生丝水分扩散涉及表面、纤维间及纤维内3个阶段,熟丝水分扩散涉及表面和纤维间2个阶段。保胶蚕丝在吸湿性方面优势显著,在吸湿排汗面料领域具有应用潜力。

关键词:保胶蚕丝;形态结构;回潮率;吸湿机理

中图分类号:TS 147

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2025)08-0017-08

Study on the morphological structure and moisture absorption properties of sericin-retained silk

Zhang Ting¹, Shen Hua^{1,2}, Xu Guangbiao¹

1. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Wujiang Dingsheng Silk Company, Suzhou 215228, Jiangsu, China

Abstract: Sericin-retained silk is a modified silk that retains its natural sericin content. The fiber characteristics of sericin-retained silk, raw silk, and degummed silk were systematically evaluated through scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction (XRD), along with analysis of degumming loss percentage and moisture absorption. The study revealed that sericin-retained silk exhibits an irregular triangular cross-section and a longitudinally smooth surface with localized fracture points. FTIR analysis revealed that the three types of silk were the same, and the main structure of sericin-retained silk was consistent with that of raw silk. The degumming loss percentage of sericin-retained silk was 1.1%. However, sericin-retained silk demonstrated superior moisture absorption, achieved a moisture regain of 12.67% under the standard conditions (20 °C, 65% relative humidity). Moisture absorption kinetics

基金项目:中国博士后科学基金资助(2023M742678);上海市2024年度“科技创新行动计划”国内科技合作领域项目(24010701100);上海市教育委员会人工智能赋能科研计划资助(SMEC-AI-DHUY-02)

收稿日期:2025-03-11

作者简介:张霆,男,2001年生,在读硕士研究生,主要研究方向为蚕丝产品的开发,1906038428@qq.com

通信作者:徐广标,教授,研究方向为纺织材料与纺织品设计,guangbiao_xu@dhu.edu.cn

revealed that the hygroscopic processes of all three silk fibers conformed to the quasi-second-order kinetic model. For sericin-retained silk and raw silk, moisture diffusion involved three stages: surface adsorption, inter-fiber penetration, and intra-fiber migration. The moisture diffusion of degummed silk exhibited only two stages: surface and inter-fiber diffusion. Sericin-retained silk had exceptional moisture absorption capabilities, and had applications in the field of moisture-wicking textiles.

Keywords: sericin-retained silk; morphological structure; moisture regain; moisture absorption mechanism

蚕丝向来有“纤维皇后”美誉,作为一种天然蛋白质纤维,其含有 18 种氨基酸,包括人体必需的多种氨基酸,具有良好的亲肤性^[1-2]。蚕丝纤维触感柔软滑糯,光泽温婉,且具备良好的吸湿透气性,由蚕丝织造的面料被誉为“人体第二肌肤”^[3-4],穿着时极为舒适。

蚕丝主要由丝胶和丝素组成,其中丝素为其主体成分,丝胶则包裹于丝素外层,起到粘连与保护的作用^[5]。然而,丝胶以及蚕丝表面的蜡质、油脂等杂质,会对后续的制备工艺造成影响。传统工艺中,常通过煮沸的方式去除丝胶。董雪^[6]研究了不同脱胶方法对蚕丝力学性能、外观形态及二次结构的影响,研究表明,试验中的不同脱胶方法均会对蚕丝造成一定损伤。同时,也有研究数据证实,脱胶过程中产生的废水会对环境造成严重污染。张浩茹等^[7]分析 6 种脱胶方法所产生的废水中污染物的含量,发现制丝废水对环境危害严重。鉴于此,研究者尝试将丝胶固着于丝素表面并开发新产品,以实现无害化。乔志等^[8]采用氨基化合物改性三聚氰氨产物对蚕丝进行固胶工艺处理,发现固胶后蚕丝的断裂强度变大且耐热稳定性显著提高。杨媛媛等^[9]研究了不同含胶率下蚕丝的最优固胶工艺,且利用固胶后的蚕丝制备蚕丝被,结果显示,经固胶工艺处理后,蚕丝被的克罗值提升了约 16%,抗压性也有所增强,蚕丝被的保暖性能提升。

本研究以经生物大分子修饰技术改性的保胶蚕丝、未经脱胶的生丝,以及经传统工艺煮沸脱胶处理的熟丝为研究对象,通过全面对比这 3 种纤维的形态结构特征、练减率以及吸湿性能,深入分析它们的形态结构差异,探讨吸湿性能的异同和机理,为保胶蚕丝纤维的后续应用提供理论基础与试验支撑。

1 试验部分

1.1 试验材料

试验材料:保胶蚕丝、生丝、熟丝,均由杭州朵仕科技有限公司提供,规格参数如表 1 所示;碳酸钠(Na_2CO_3),质量分数为 99%,购自上海麦克林生化科技有限公司;中性皂,购自盛宏仪器检测有限公司。

表 1 纤维规格参数

Tab. 1 Fiber specification parameters

纤维种类	保胶蚕丝	生丝	熟丝
线密度/tex	0.229	0.305	0.124

1.2 测试方法

1.2.1 纤维表面形态

采用 TM3000 型扫描电子显微镜观察纤维表面形态。首先用纤维切断器对 3 种蚕丝进行切断处理,随后用火棉胶对切断样品进行涂覆,再将样品用导电胶固定在电镜台上,最后对样品进行真空喷金处理,得到待测样。

1.2.2 傅里叶红外光谱

采用 Nicolet 6700 型傅里叶红外光谱仪对纤维进行扫描。将保胶蚕丝、生丝和熟丝用 BJ-150 型高速研磨机研磨成微细粉末,将纤维粉末样品放置于扫描窗口,设置测力计压力为 80 N,使用衰减全反射法(ATR)对样品进行测试。

1.2.3 X 射线衍射

采用 Bruker D8 ADVANCE X 射线衍射仪测试纤维的结晶度。将保胶蚕丝、生丝和熟丝纤维用 BJ-150 型研磨机研磨成粒径约 48 μm 的粉末,对粉末样品进行晶体结构测试,得到结晶度等相关数据。

1.2.4 练减率

参照 GB/T 32015—2015《丝绸 练减率试验方法》，称取一定质量的纤维，放入 110 ℃ 的 Y802N 八篮恒温烘箱中烘至质量稳定，称得干燥纤维的质量为 M_0 (g)，按照浴比为 1:100， Na_2CO_3 0.5 g/L，工业中性皂 5 g/L 配置溶液，将纤维置于该溶液中，在 100 ℃ 在水浴锅中煮沸 30 min，完成第一次煮练，结束后用三级水充分洗涤试样；随后用 Na_2CO_3 配置 pH 值为 9 的溶液，按照浴比 1:100 将纤维置于该溶液中，在 100 ℃ 水浴锅中煮沸 30 min，进行第二次煮练。最后将纤维用三级水洗涤后放入 110 ℃ 的烘箱中干燥，取出称得质量 M_1 (g)，依据式(1)计算练减率 L (%)。

$$L = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

1.2.5 吸湿性能

参照 GB/T 6503—2017《化学纤维 回潮率测试

方法》测试纤维吸湿性能。将一定量的纤维放在烘箱中烘至质量稳定后，快速移至天平上称得干燥纤维的质量 M'_0 (g)；随后快速移至已设定的标准环境 [温度 (20 ± 2) ℃，湿度 $(65 \pm 3)\%$] 中，每隔一段时间将纤维取出称得到质量 M'_t (g) 后，再将纤维放回标准环境中，反复多次直至纤维吸附水蒸气达到饱和。通过式(2)得到 t 时的吸湿回潮率 W_t (%) 与时间的关系。

$$W_t = \frac{M'_t - M'_0}{M'_0} \times 100\% \quad (2)$$

2 结果与讨论

2.1 纤维表面形态

对保胶蚕丝、生丝和熟丝的表现形态进行表征，对比表面结构差异，结果如图 1 所示。

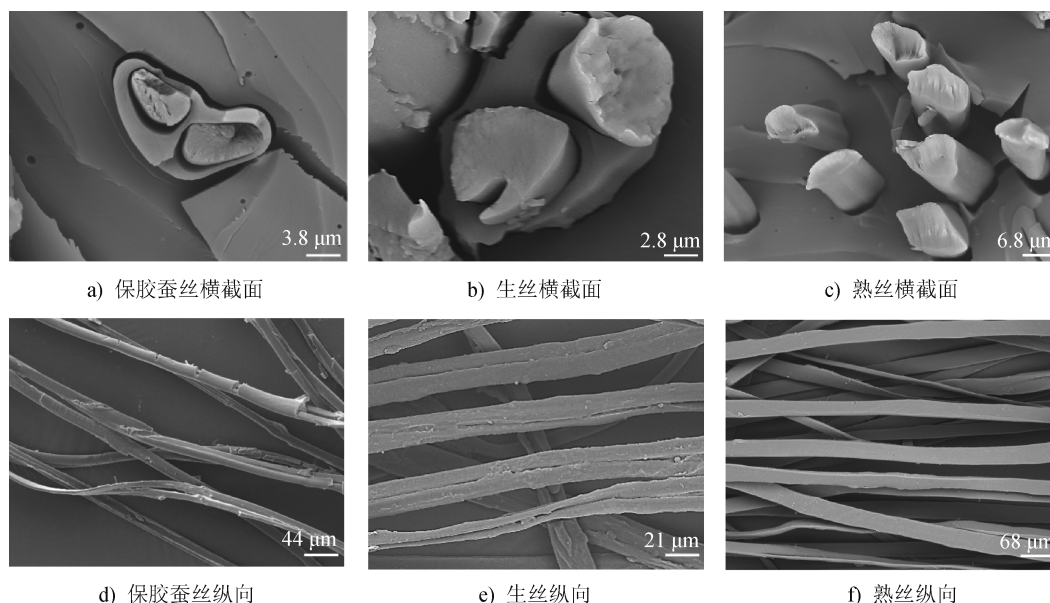


图 1 保胶蚕丝、生丝和熟丝的扫描电镜照片

Fig. 1 Scanning electron micrographs of sericin-retained silk, raw silk, and degummed silk

从 3 种纤维横截面的扫描电镜照片可以发现，保胶蚕丝横截面形状类似于不规则三角形，且表面的丝胶有效保留在丝素上，与生丝相比其丝胶含量并未减少；生丝横截面形状同样类似于不规则三角形；熟丝表面无丝胶，原 2 根并排的丝素分离成单根丝素。从 3 种纤维纵向的电镜照片可以发现：保胶蚕丝表面的丝胶光滑但存在局部断裂，导致少部分丝素未被丝胶包裹；生丝表面包裹有一层丝胶；

熟丝表面光滑。

2.2 傅里叶红外光谱

如图 2 所示为保胶蚕丝、生丝和熟丝纤维的红外光谱图。

从图 2 可以发现：3 280 cm^{-1} 处是 N—H 和 O—H 的伸缩振动吸收峰；2 933 cm^{-1} 处是 C—H 的伸缩振动吸收峰；1 622 cm^{-1} 处是 C=O 的伸缩振动吸收峰，代表酰胺 I 带；1 526 cm^{-1} 处是 N—H 的弯曲振

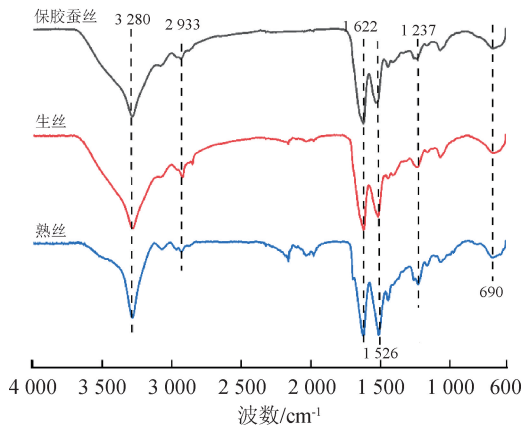


图2 保胶蚕丝、生丝和熟丝的红外光谱图

Fig. 2 Infrared spectrum of sericin-retained silk, raw silk, and degummed silk

动吸收峰,代表酰胺Ⅱ带;1 237 cm^{-1} 处是 C—N 的伸缩振动吸收峰,代表酰胺Ⅲ带;690 cm^{-1} 处是 C—H 的面外弯曲振动吸收峰。保胶蚕丝、生丝和熟丝 3 种纤维均为天然蛋白质纤维,红外光谱图中特征峰与蛋白质中氨基酸的特征峰基本吻合。对比 3 种纤维的红外光谱图可知,无基团消失,也无新基团产生,说明 3 种纤维在氨基酸组分上没有显著差异。

2.3 X 射线衍射

如图 3 所示为保胶蚕丝、生丝和熟丝的 X 射线衍射图。

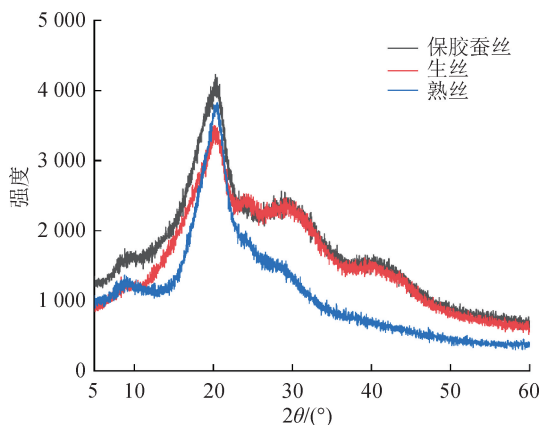


图3 保胶蚕丝、生丝和熟丝的 X 射线衍射图谱

Fig. 3 X-ray diffraction patterns of sericin-retained silk, raw silk, and degummed silk

从图 3 可知,保胶蚕丝、生丝和熟丝均在 20° 左右出现强衍射峰,分别在 30°、40° 和 28° 左右出现弱衍射峰。保胶蚕丝和生丝的 X 射线衍射峰的峰形和峰位差别不大,说明 2 种纤维的主体结构基本相

同;熟丝的 X 射线衍射图谱与前两者纤维的差异较大,表明熟丝的结构与前两者的明显不同。

2.4 练减率

保胶蚕丝、生丝和熟丝的练减率如表 2 所示,保胶蚕丝的练减率极低,与熟丝的练减率接近,表明保胶蚕丝的丝胶能够稳定包裹在丝素外层,经过练减后丝胶几乎无损失。生丝练减率最高,说明其丝胶和杂质在练减过程中被大量溶解并脱落。熟丝由于经过传统脱胶工艺已去除丝胶,因此练减过程中仅去除少量杂质,练减率接近 0。

表 2 保胶蚕丝、生丝和熟丝的练减率

Tab. 2 Degumming loss percentage of sericin-retained silk, raw silk, and degummed silk

纤维种类	保胶蚕丝	生丝	熟丝
练减率/%	1.1	23.7	0.9
练减率标准差/%	23.47	4.23	28.69

2.5 吸湿性能

2.5.1 吸湿曲线

保胶蚕丝、生丝和熟丝在标准条件(20 ℃、相对湿度 65%)下的吸湿曲线如图 4 所示。

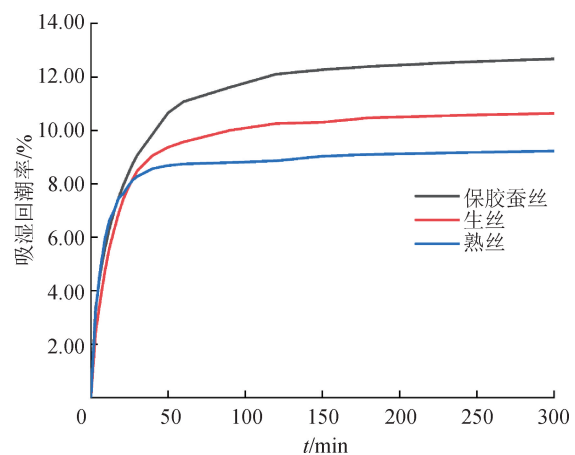


图4 保胶蚕丝、生丝和熟丝在标准条件(20 ℃、相对湿度 65%)下的吸湿曲线

Fig. 4 Moisture adsorption curves of sericin-retained silk, raw and degummed silk fibers under standard conditions (20 ℃, 65% relative humidity)

从图 4 可以发现,3 种纤维的吸湿回潮率在初始阶段随着时间的增加呈指数增加的趋势,初始吸湿速率相近。其中,保胶蚕丝达到吸湿平衡所需时间最长,且最终吸湿回潮率最高,达到 12.67%。这是由于保胶蚕丝中羧基和羟基等亲水性活性基团数量

的减少,导致其吸附水分子的位点减少,进而吸湿平衡的时间变长。此外,保胶蚕丝结晶度最低,故而随着吸湿时间的延长,水分子逐渐进入纤维的非晶区,达到吸湿平衡时,吸湿量最大。

2.5.2 吸湿动力学

为进一步研究 3 种纤维的吸湿机理,在标准条件(20 ℃、相对湿度 65%)下对 3 种纤维的吸湿过程进行分析,采用吸附动力学模型对吸湿曲线进行拟合,采用准一级动力学模型^[10]、准二级动力学模型^[11]和 Weber-Morris 动力学模型^[12-13]对吸湿机理进行描述。

(1) 准一级动力学模型

准一级动力学模型描述了基于物理吸附的方程,该模型假设吸附物的吸附速率与吸附剂表面未被占据的吸附位点数量成正比。准一级动力学方程如式(3)所示:

$$\ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - k_f t \quad (3)$$

式中: Q_e 为吸湿平衡时的吸湿量, g/kg; Q_t 为 t 时刻的吸湿量, g/kg; k_f 为准一级吸附动力学常数, g/(kg·min)。

(2) 准二级动力学模型

准二级动力学模型描述了基于化学吸附控制吸附速率的方程,准二级动力学方程如式(4)所示:

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{k_s Q_e^2} + \frac{1}{Q_e} t \quad (4)$$

表 3 保胶蚕丝、生丝和熟丝吸湿的准一级动力学模型的动力学参数

Tab. 3 Kinetic parameters of quasi-first-order kinetic model for moisture absorption of sericin-retained silk, raw silk and degummed silk

纤维种类	$Q_e/(g \cdot kg^{-1})$	准一级动力学模型		
		$k_f/[g \cdot (kg \cdot min)^{-1}]$	方程	R^2
保胶蚕丝	126.68	18.87×10^{-3}	$y = 4.2894 - 0.0189x$	0.961
生丝	106.35	19.66×10^{-3}	$y = 3.9803 - 0.0197x$	0.931
熟丝	92.27	17.97×10^{-3}	$y = 3.3215 - 0.0179x$	0.832

对保胶蚕丝、生丝和熟丝在标准环境下的吸湿曲线进行准二级动力学模型拟合,其拟合图如图 6 所示,拟合参数如表 4 所示。

对比分析表 3 和表 4 中的 3 种纤维动力学拟合参数,发现 3 种纤维准二级动力学模型的拟合值都比准一级动力学模型的拟合值高,证实准二级动力学模型对 3 种纤维的拟合效果更好,说明 3 种纤维的吸湿不是单纯的物理吸附,而是物理吸附和化学

式中: k_s 为准二级吸附动力学常数, kg/(g·min)。

(3) Weber-Morris 动力学模型

Weber-Morris 动力学模型常用来分析反应中的控制步骤,计算吸附剂的颗粒内扩散速率常数,扩散模型如式(5)所示:

$$Q_t = k_p t^{1/2} + C \quad (5)$$

式中: k_p 为颗粒内扩散速率常数, g/(kg·min^{-1/2}); C 为厚度和边界层相关的常数。

对保胶蚕丝、生丝和熟丝在标准环境下的吸湿曲线进行准一级动力学模型拟合,其拟合图如图 5 所示,拟合参数如表 3 所示。

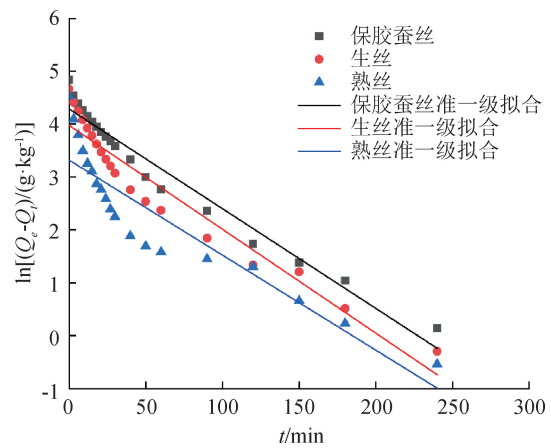


图 5 保胶蚕丝、生丝和熟丝吸湿的准一级动力学模型拟合

Fig. 5 Quasi-first-order kinetic model fitting of moisture absorption for sericin-retained silk, raw silk and degummed silk

吸附共同作用的结果。

进一步分析准二级动力学模型可以发现:保胶蚕丝具有最小的准二级吸附动力学常数, k_s 为 0.66×10^{-3} kg/(g·min),但平衡时的吸湿量最高,这归因于纤维中丝胶的保留,增强了水分子和极性基团的化学键合力;熟丝的 k_s 最大,为 2.43×10^{-3} kg/(g·min),表明脱胶后纤维表面活性位点减少,需要更高的吸附速率以达到吸湿平衡。

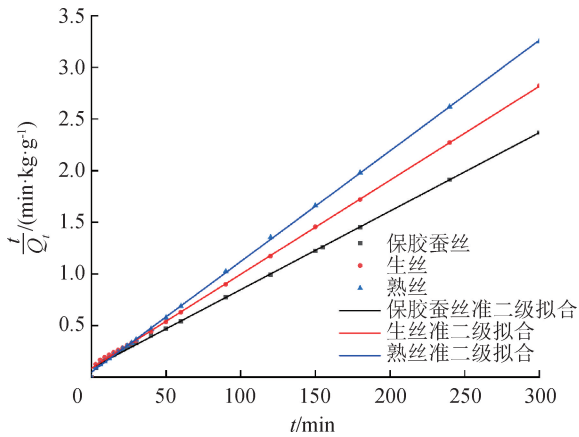


图6 保胶蚕丝、生丝和熟丝吸湿的准二级动力学模型拟合
Fig. 6 Quasi second-order kinetic model fitting diagram of moisture absorption for sericin-retained silk, raw silk, and degummed silk

表4 保胶蚕丝、生丝和熟丝纤维吸湿的准二级动力学模型的动力学参数

Tab. 4 Kinetic parameters of quasi-second-order kinetic model for moisture absorption of sericin-retained silk, raw silk, and degummed silk

纤维种类	$Q_c / (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	准二级动力学模型		
		$k_s / [\text{kg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}]$	方程	R^2
保胶蚕丝	126.68	0.66×10^{-3}	$y = 0.0874 + 0.0076x$	0.999
生丝	106.35	0.97×10^{-3}	$y = 0.0856 + 0.0091x$	0.999
熟丝	92.27	2.43×10^{-3}	$y = 0.0472 + 0.0107x$	0.998

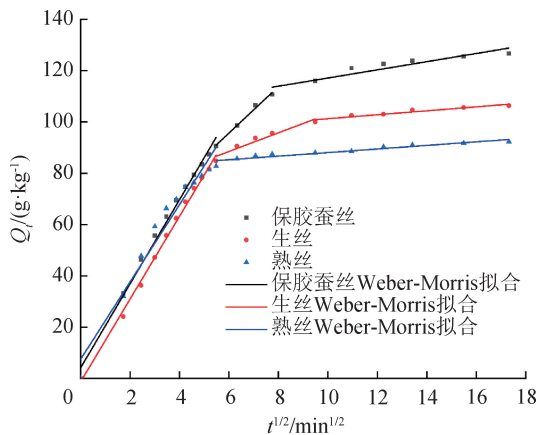


图7 保胶蚕丝、生丝和熟丝吸湿的Weber-Morris动力学模型拟合

Fig. 7 Weber-Morris kinetic model fitting of moisture absorption for sericin-retained silk, raw silk, and degummed silk

著增加。第三阶段保胶蚕丝的 k_p 值小但 C 值高,这表明保胶蚕丝的无定形区较多,能够稳定储存水分。

对保胶蚕丝、生丝和熟丝在标准环境下的吸湿曲线进行Weber-Morris动力学模型拟合,其拟合图如图7所示,拟合参数如表5所示。

可以发现,3种纤维的 Q_t 与 $t^{1/2}$ 在各阶段呈线性关系,但都不经过原点,表明内扩散过程在吸湿过程中发挥了一定作用,但并不是控制吸湿过程的唯一因素^[14]。同时可以发现,保胶蚕丝的第一阶段 k_p 值最大,表明水分子在丝胶层表面快速吸附,原因与丝胶中羟基、羧基等极性基团与水分子形成氢键,吸附速率大有关。第二阶段中保胶蚕丝和生丝 k_p 值减小,吸附速率降低,这可能是由于纤维间隙对水扩散存在一定阻力,第二阶段熟丝的 k_p 值骤降,是因为脱胶后纤维间结构更紧密,空隙减少,扩散阻力显

2.5.3 吸湿机理

图8描述了气态水在保胶蚕丝和生丝纤维集体内的扩散现象,分为表面扩散、纤维间扩散和纤维内扩散3个阶段。图9描述了气态水在熟丝纤维集体内的扩散现象,分为表面扩散和纤维间扩散2个阶段。

如图8和图9所示,气态水先吸附在纤维表面,然后随着气态水的扩散慢慢聚集成液态水,吸附动力学的拟合结果表明3种纤维的吸湿过程既存在物理吸附,也存在化学吸附。蚕丝为天然蛋白质纤维,由18种氨基酸组成。这些氨基酸上存在大量的亲水极性基团,能与水分子形成氢键进而固着水分子。随后液态水在纤维间扩散,由于纤维集体中纤维间存在空隙,芯吸作用使得液态水在纤维间的空隙扩散。另外,由于保胶蚕丝和生丝的纤维结构类似于皮芯结构,表面丝胶和内部丝素的吸湿性能不同,因此水分会从丝胶层向丝素层扩散。

表 5 保胶蚕丝、生丝和熟丝吸湿的 Weber-Morris 动力学模型的动力学参数

Tab. 5 Kinetic parameters of Weber-Morris kinetic model for moisture absorption of sericin-retained silk, raw silk, and degummed silk

纤维种类	内扩散阶段	Weber-Morris 动力学模型			
		$k_p / [g \cdot (kg \cdot min^{-1/2})^{-1}]$	方程	$C / (g \cdot kg^{-1})$	R^2
保胶蚕丝	第一阶段	16.40	$y = 4.1096 + 16.4005x$	4.11	0.992
	第二阶段	9.05	$y = 41.3735 + 9.0515x$	41.37	0.987
	第三阶段	1.59	$y = 101.1978 + 1.5938x$	101.20	0.853
生丝	第一阶段	16.13	$y = -1.3178 + 16.1337x$	-1.32	0.995
	第二阶段	3.64	$y = 66.6763 + 3.6376x$	66.68	0.921
	第三阶段	0.77	$y = 93.5526 + 0.7715x$	93.55	0.911
熟丝	第一阶段	15.08	$y = 7.4584 + 15.0841x$	7.46	0.955
	第二阶段	0.70	$y = 81.0908 + 0.6977x$	81.09	0.887

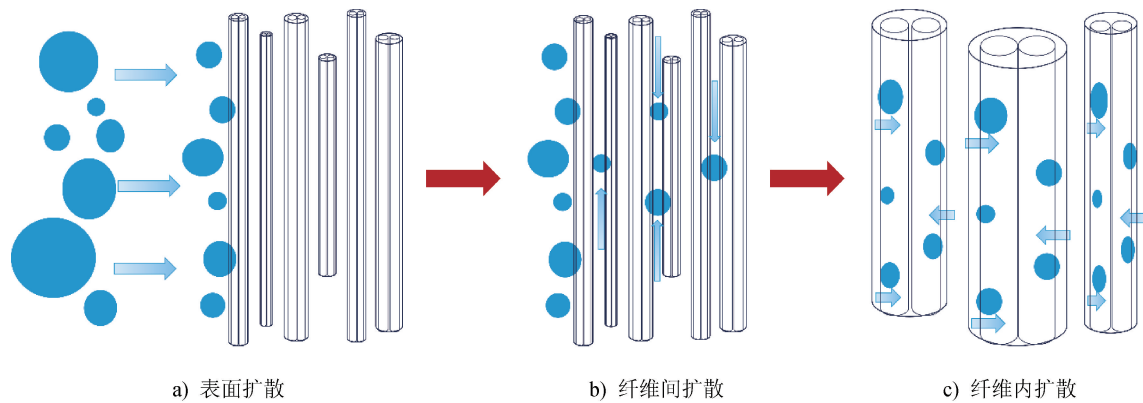


图 8 气态水在保胶蚕丝和生丝纤维集合体扩散阶段

Fig. 8 Diffusion stage of gaseous water in sericin-retained silk and raw silk fiber aggregates

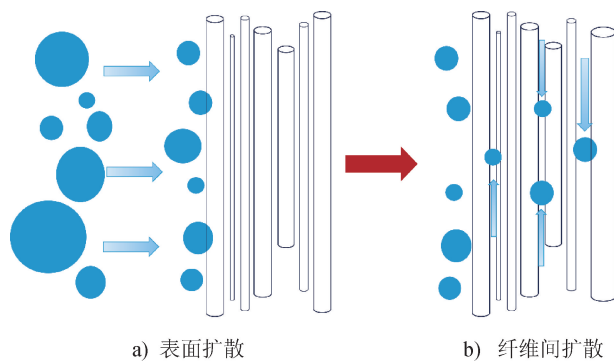


图 9 气态水在熟丝纤维集合体扩散阶段

Fig. 9 Diffusion stage of gaseous water in degummed silk fibers aggregates

(1) 纤维横截面方面保胶蚕丝呈不规则三角形,与生丝结构相近;纤维纵向方面,保胶蚕丝丝胶层存在局部断裂,生丝被完整丝胶包裹,熟丝因脱胶处理,丝素分离为单根,表面无丝胶残留,十分光滑;红外光谱分析表明,3 种纤维特征基团相同;X 射线衍射分析表明,保胶蚕丝和生丝的主体结构基本相同。

(2) 保胶蚕丝、生丝及熟丝的练减率分别为 1.1%、23.7% 和 0.9%。保胶蚕丝在标准条件(20 ℃、相对湿度 65%)下吸湿回潮率为 12.67%,高于生丝和熟丝。吸湿动力学分析表明,3 种纤维的吸湿过程符合准二级动力学模型,保胶蚕丝和生丝水分扩散分为表面、纤维间及纤维内 3 个阶段,熟丝水分扩散分为表面和纤维间 2 个阶段。

3 结论

本研究针对保胶蚕丝的形态结构与性能进行全面评价,并与生丝和传统工艺制备的熟丝进行对比分析。主要得出以下结论:



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 胥鑫萌, 刘伟, 童天娇, 等. 天然蚕丝在纺织中的应用[J]. 蚕桑茶叶通讯, 2021(3): 9-12.
- [2] 熊佳琪. 桑蚕丝拉曼检测技术研究及标准样品研制[D]. 上海: 东华大学, 2023.
- [3] 张忠信. 雄蚕丝、普通蚕丝及其织物性能研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2018.
- [4] 唐樛秋, 贾耀芳, 杨晓伟, 等. 蚕丝/竹纤维卫生用品面层的制备及性能研究[J]. 产业用纺织品, 2017, 35(9): 8-11.
- [5] 郑梦雨, 张金珍, 丁圆圆, 等. 蚕丝/大豆蛋白纤维交织物的抗菌与远红外性能[J]. 现代纺织技术, 2025, 33(1): 36-43.
- [6] 董雪. 不同脱胶方法对蚕丝性能和废水 COD 的影响及脱胶废水处理[D]. 苏州: 苏州大学, 2012.
- [7] 张浩茹, 霍长金, 夏鑫媛, 等. 柞蚕茧脱胶废水的水质分析与评价[J]. 山东化工, 2023, 52(8): 234-237.
- [8] 乔志. 氨基化合物改性三聚氰氨产物对蚕丝固胶性能的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2022.
- [9] 杨媛媛, 徐英莲, 徐琳. 利用丝胶固着技术改善蚕丝被性能研究[J]. 丝绸, 2012, 49(11): 23-27.
- [10] NANDI B K, GOSWAMI A, PURKAIT M K. Removal of cationic dyes from aqueous solutions by kaolin: kinetic and equilibrium studies [J]. Applied Clay Science, 2009, 42(3/4): 583-590.
- [11] HO Y S, MCKAY G. Pseudo-second order model for sorption processes[J]. Process Biochemistry, 1999, 34(5): 451-465.
- [12] BORTOLUZ J, FERRARINI F, BONETTO L R, et al. Use of low-cost natural waste from the furniture industry for the removal of methylene blue by adsorption: isotherms, kinetics and thermodynamics[J]. Cellulose, 2020, 27(11): 6445-6466.
- [13] HUBBE M, AZIZIAN S, DOUVEN S. Implications of apparent pseudo-second-order adsorption kinetics onto cellulosic materials: a review[J]. BioResources, 2019, 14(3): 7582-7626.
- [14] CAO L Y, WANG H C, SHEN H, et al. Adsorption performance of human-like collagen by alkali-modified kapok fiber: a kinetic, equilibrium, and mechanistic investigation[J]. Cellulose, 2022, 29(6): 3177-3193.
-
- (上接第 10 页)
- [59] ATES H C, YETISEN A K, GÜDER F, et al. Wearable devices for the detection of COVID-19 [J]. Nature Electronics, 2021, 4(1): 13-14.
- [60] ZHAO L, WEN Z Z, JIANG F J, et al. Silk/polyols/GOD microneedle based electrochemical biosensor for continuous glucose monitoring [J]. RSC Advances, 2020, 10(11): 6163-6171.
- [61] 张萌, 徐岚. 静电纺丝素蛋白基纳米纤维在组织工程中的应用[J]. 产业用纺织品, 2022, 40(12): 1-8.
- [62] XU Z Y, QIAO X J, TAO R Z, et al. A wearable sensor based on multifunctional conductive hydrogel for simultaneous accurate pH and tyrosine monitoring in sweat [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2023, 234: 115360.
- [63] DUAN Z H, JIANG Y D, TAI H L. Recent advances in humidity sensors for human body related humidity detection[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2021, 9(42): 14963-14980.

富强 民主 文明 和谐
自由 平等 公正 法治
爱国 敬业 诚信 友善