

漆酶催化阿魏酸对修复羊毛毡缩损伤的影响

曹子涵, 巫瑛, 王司宇, 苏静, 王鸿博*

(江南大学纺织科学与工程学院, 江苏无锡 214122)

摘要:为解决羊毛织物防毡缩处理后力学性能受损的问题,使用 L-半胱氨酸改善羊毛的防毡缩性能,并采用漆酶催化阿魏酸交联羊毛织物,探讨 L-半胱氨酸预处理及酶法交联改性处理对织物强力的修复机理。结果表明:采用 L-半胱氨酸处理后羊毛织物的毡缩率由原先的 18.67% 降低至 6.84%,但断裂强力经向损失 34.77%,纬向损失 32.81%,断裂伸长率经向提升 13.18%,纬向提升 19.88%;使用漆酶催化阿魏酸交联羊毛织物后,断裂强力经向修复 14.21%,纬向修复 13.54%,织物毡缩率下降至 6.49%,满足面料的防毡缩要求,且断裂强力得到有效修复,实现了羊毛的酶法低损伤防毡缩整理。

关键词: 防毡缩整理;漆酶;强力修复;羊毛;阿魏酸

中图分类号: TS 131.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2024)06-0471-07

Effect of Laccase-Catalyzed Ferulic Acid on Repairing Felting Shrinkage Damage of Wool

CAO Zihan, WU Ying, WANG Siyu, SU Jing, WANG Hongbo*

(College of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: In order to solve the problem of mechanical property damage of wool fabrics after anti-felting shrinkage treatment, L-cysteine was used to improve the anti-felting shrinkage performance of wool, and laccase-catalyzed cross-linking of ferulic acid was used to cross-link wool fabrics, to investigate the restoration mechanism of the strength of the fabrics by L-cysteine pre-treatment and enzymatic cross-linking modification treatment. The results show that the felting shrinkage rate of wool fabric treated with L-cysteine decreased from 18.67% to 6.84%, but the loss of breaking strength is 34.77% in the warp direction and 32.81% in the weft direction, and the increase of breaking elongation is 13.18% in the warp direction and 19.88% in the weft direction. After cross-linking wool fabrics with laccase-catalyzed ferulic acid, the breaking strength is repaired by 14.21% in the warp direction and 13.54% in the weft direction, and the felting shrinkage rate is 6.49%, which meet fabrics' anti-felting shrinkage requirements, and the breaking strength is repaired effectively, realizing the enzymatic low-damage anti-felting shrinkage treatment of wool.

Key words: anti-felting shrinkage treatment, laccase, strength repair, wool, ferulic acid

羊毛作为纺织行业常用的天然原料,具有弹性大、手感柔和、保暖性好的优点。但是,毛织物在洗涤时易收缩、毡并,影响服用性能^[1],因此,防毡缩整理是羊毛纺织品生产中极为重要的工序。防毡

缩的基本原理为通过剥落或覆盖鳞片层减小定向摩擦效应。目前,常见的化学整理方法有降解法、聚合物沉积法等^[2-5],其缺点为污染环境、易损伤羊毛纤维结构;物理整理方法有超声波处理法、等离

收稿日期:2024-03-21; 修订日期:2024-08-30。

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(52003108)。

作者简介:曹子涵(2000—),女,硕士研究生。

*通信作者:王鸿博(1963—),男,教授,博士生导师。主要研究方向为功能纺织材料、纺织技术、纺织新产品开发。

Email:wxwanghb@163.com

子体处理法等,但存在整理效果不稳定、具有时限性等问题。生物酶法因其高效、温和的特性,成为当前业内研究的热点^[6-9],但局限于蛋白酶领域,鲜有漆酶相关的研究成果。由于防毡缩整理中常用的降解法、蛋白酶法容易对织物造成损伤,因此低损伤防毡缩处理方法成为学者关注的重点。MEI J X等^[10]制备了新型三功能蛋白酶,在温和条件下去除了羊毛表面鳞片。飞中琳等^[11]将合成的聚氨酯预聚体接枝到已被还原的羊毛大分子中,在断裂强力保留率较高的情况下,标准水洗25次后羊毛织物的毡缩率仍保持在15.57%以内。骆坚城等^[12]采用商品化角蛋白酶和Savinase蛋白酶协同处理的方式进行羊毛织物二浴法防毡缩整理,在保持低强力损伤的同时,改善了羊毛织物的防毡缩性能。

文中采用L-半胱氨酸对羊毛织物进行预处理,通过破坏鳞片层的方式避免织物毡缩,再利用漆酶催化阿魏酸交联羊毛对织物的力学性能损伤进行修复,考察整理后羊毛力学性能的修复情况和服用性能的变化。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 原料 羊毛织物(平纹,经密220根/dm,纬密200根/dm;经向线密度35 tex,纬向线密度35 tex),苏州南方毛业有限公司提供;L-半胱氨酸(浓度为0.4 mol/L),北京伊诺凯科技有限公司生产;漆酶(质量浓度为16 mg/mL),诺维信公司生产;阿魏酸(浓度为0.03 mol/L),北京伊诺凯科技有限公司生产;蛋白酶(质量浓度为27 mg/mL),诺维信公司生产;乙酸(浓度为0.2 mol/L),氢氧化钠(浓度为0.6 mol/L),均为国药集团化学试剂有限公司生产。

1.1.2 仪器 CP114电子天平,上海奥豪斯仪器有限公司制造;HH-4数显恒温水浴锅,金坛华容仪器有限公司制造;QWZY-X3三层振荡培养箱(摇床),太仓强文实验设备有限公司制造;Y(B)089A型全自动缩水率试验机,温州大荣纺织仪器有限公司制造;HD026NS电子织物强力仪,南通宏大实验仪器有限公司制造;YG461E-III全自动透气量仪,宁波纺织仪器厂制造;YG601H-II织物透湿仪,宁波纺织仪器厂制造;Nicolet iS10傅里叶变换红外光谱仪,美国赛默飞世尔科技(中国)有限公司制造;TGA4000热重分析仪,铂金埃尔默股份有限公司制造;VHX-500超景深三维数码显微镜,基恩士(香港)有限公司制造。

1.2 方法

1.2.1 羊毛织物防毡缩处理工艺

1)脱脂精炼。羊毛织物使用质量浓度为0.5 g/L的十二烷基硫酸钠溶液水浴50℃脱脂处理1 h,浴比为1:20,处理完成后将试样用去离子水洗净,置于40℃烘箱中干燥。

2)L-半胱氨酸处理。脱脂后将羊毛织物置于浓度为0.4 mol/L的L-半胱氨酸溶液中毡缩处理1 h,处理完成后将试样洗涤干燥。

1.2.2 漆酶催化阿魏酸接枝/交联羊毛工艺 向浓度为0.03 mol/L的阿魏酸溶液中加入质量浓度为16 mg/mL的漆酶溶液,在摇床中振荡2 h后,放入预处理的羊毛织物,在45℃、pH=5的环境下放置6 h,待反应结束后,将织物洗涤、干燥。

1.2.3 漆酶催化阿魏酸聚合工艺 将10 mg阿魏酸完全溶解于20 mL醋酸缓冲液中,并置于摇床内,在45℃、pH=5、转速100 r/min条件下反应4 h,置于离心机振荡,然后取上清液进行后续测试。

1.2.4 羊毛织物表征 使用超景深电子显微镜、傅里叶变换红外光谱、热重分析仪对织物的表面形貌、结构变化情况进行分析。

1.2.5 羊毛织物性能测试 参照ISO 6330《欧标缩水率测试机试验》^[13],对羊毛织物执行1次7A标准循环及3次5A标准循环的洗涤测试,并计算羊毛织物的毡缩率,公式为

$$F = \frac{S_1 - S_2}{S_1} \quad (1)$$

式中: F 为羊毛织物的毡缩率(%); S_1 为织物7A洗涤后的面积(m^2); S_2 为织物5A标准洗涤后的面积(m^2)。

参照GB/T 3923.1—2013《纺织品 织物拉伸性能 第1部分:断裂强力和断裂伸长率的测定(条样法)》^[14],使用电子织物强力仪测定羊毛织物断裂强力及断裂伸长率;参照GB/T 5453—1997《纺织品 织物透气性的测定》^[15],使用全自动透气量仪测定织物透气性能;参照GB/T 12704.2—2009《纺织品 织物透湿性试验方法 第2部分:蒸发法》^[16],使用织物透湿仪测定织物透湿性能。

1.2.6 羊毛织物碱溶解度测试 羊毛织物损伤程度由碱溶解度表示。参照GB/T 7571—2008《羊毛在碱中溶解度的测定》^[17],测定羊毛织物的碱溶解度,计算公式为

$$S_w = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \quad (2)$$

式中: S_w 为碱溶解度(%); W_1 为试样干燥质量

(g); W_2 为碱溶液处理后残留物质量(g)。

2 结果与讨论

2.1 L-半胱氨酸用量对羊毛强伸性能及毡缩率的影响

为改善羊毛织物的服用性能,需对羊毛表面鳞片层进行刻蚀或剥除,以扩大羊毛织物表面与底物作用位点的面积,从而提升酶促反应效率,因此文中采用 L-半胱氨酸对羊毛进行预处理。毡缩率和断裂强力可以直观表现羊毛的防毡缩性能,毡缩率越低,防毡缩性越好;断裂强力越大,纤维损伤程度越小。采用不同浓度的 L-半胱氨酸对羊毛织物进行处理,结果如图 1 所示。

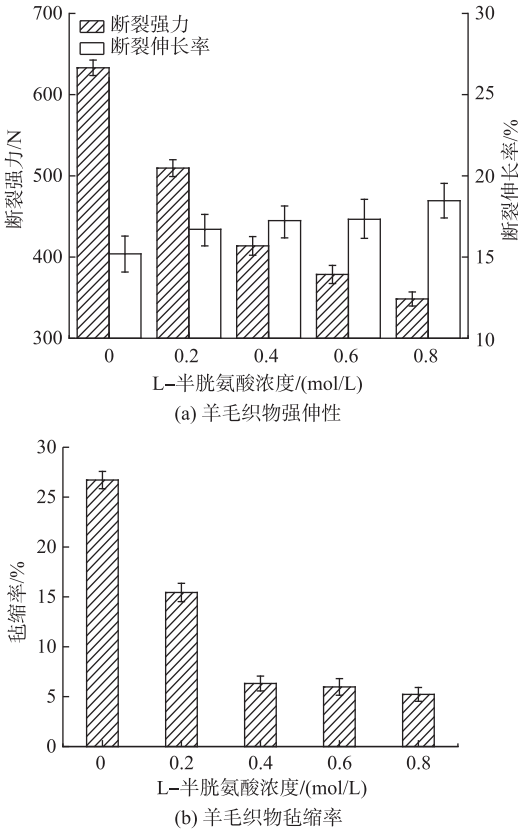


图1 L-半胱氨酸用量对羊毛织物的影响

Fig.1 Effect of L-cysteine dosage on wool fabrics

由于鳞片层二硫键含量丰富,二硫键断裂产生巯基自由基使具有定向摩擦效应的鳞片层脱落,减少了织物在湿热环境中的毡缩现象。由图 1 可以看出,当 L-半胱氨酸浓度为 0~0.4 mol/L 时,织物的毡缩率与断裂强力下降趋势明显;当 L-半胱氨酸浓度大于 0.4 mol/L 时,织物的毡缩率与断裂强力下降趋势变缓,说明 L-半胱氨酸对织物的防毡缩整理效果在其浓度为 0.4 mol/L 时达到饱和。同时, L-半胱氨酸的还原性使羊毛内部二硫键断裂,损伤织物结构,造成织物断裂强力降低^[18],综合考虑整

理后织物的毡缩性能与强伸性,选取 0.4 mol/L 为较优 L-半胱氨酸浓度。

2.2 漆酶催化阿魏酸交联羊毛织物分析

织物在漆酶催化作用下与阿魏酸寡聚物形成交联结构,以修复防毡缩整理造成的结构损伤,并对羊毛织物的强伸性、透气透湿性、稳定性产生影响。

2.2.1 处理工艺对羊毛织物毡缩率的影响 毡缩面积是对毛织物防毡缩能力的评价,数值越小,防毡缩性能越佳。不同整理条件下羊毛织物的毡缩率如图 2 所示。

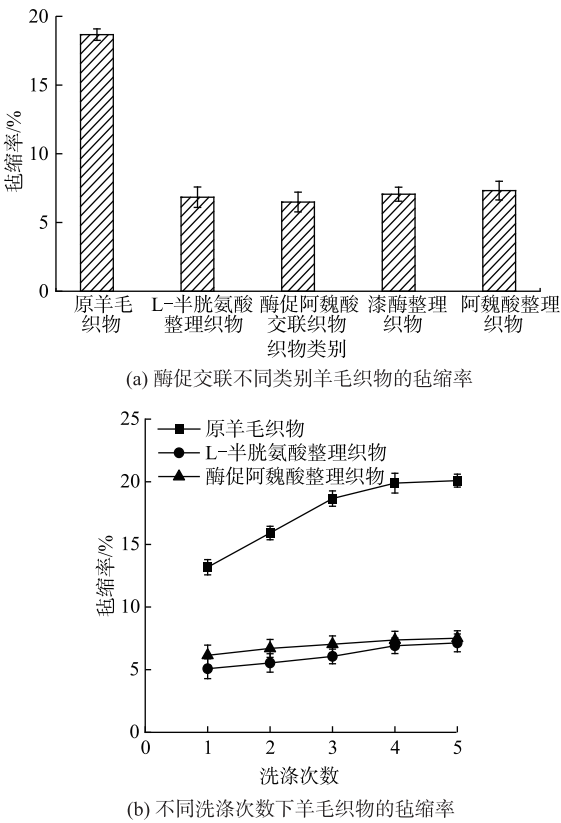


图2 羊毛织物不同处理条件下的毡缩率

Fig.2 Felting shrinkage rate of wool fabrics under different treatment conditions

由图 2 (a) 可以看出,原羊毛织物毡缩率为 18.67%,经 L-半胱氨酸整理后织物毡缩率减小为 6.84%,证明 L-半胱氨酸整理有效提升织物的防毡缩性能。酶促阿魏酸交联织物的毡缩率为 6.49%、阿魏酸整理织物和漆酶整理织物的毡缩率均在 7% 上下浮动,说明酶促反应后织物满足防毡缩羊毛织物要求(毡缩率 $\leq 8\%$)。

由图 2 (b) 可以看出,织物预处理后,随着洗涤次数的增加,毡缩率增大的速率减缓,经酶促交联后的织物在洗涤 5 次后毡缩率仍维持在 7.51%,说明酶促阿魏酸寡聚物交联于羊毛纤维,不仅可以提

升织物的防毡缩性能,还可以增加防毡缩效果的持久性。

2.2.2 漆酶催化阿魏酸交联对羊毛织物强伸性的影响 在漆酶催化作用下,阿魏酸对羊毛织物强伸性的影响如图 3 所示。漆酶可以氧化酪氨酸、半胱氨酸和色氨酸,并使其氧化物之间形成交联结构,以此提升织物的断裂强力。由图 3 可以看出,相较于原羊毛织物,经 L-半胱氨酸防毡缩整理后的织物断裂强力经向损失 34.77%,纬向损失 32.81%;断裂伸长率经向提升 13.18%,纬向提升 19.88%。相较于 L-半胱氨酸防毡缩整理织物,单独使用漆酶整理织物的断裂强力提升较少,可能是由于羊毛中酪氨酸和色氨酸含量较低^[19]。仅用阿魏酸整理的织物强伸性略微增加,证明在无漆酶催化作用下,交联过程仍可进行但效率低下。酶促阿魏酸交联织物相较于L-半胱氨酸整理后的损伤织物,断裂强力经向修复 14.21%,纬向修复 13.54%。由此证明,漆酶催化阿魏酸交联有助于稳定羊毛织物内部结构,并提升抗拉伸性能。

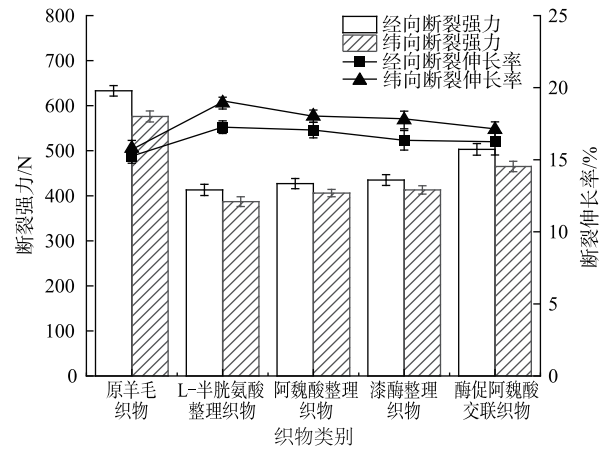


图 3 漆酶催化阿魏酸交联对羊毛织物强伸性的影响
Fig. 3 Effect of laccase-catalyzed ferulic acid cross-linking on the strength elongation of wool fabrics

2.2.3 漆酶催化阿魏酸交联对羊毛织物碱溶解度的影响 羊毛的损伤程度可以通过碱溶解度体现,漆酶催化阿魏酸交联对羊毛织物碱溶解度的影响如图 4 所示。羊毛织物预处理后,L-半胱氨酸作为还原剂作用于二硫键,通过巯基发生交换反应,将羊毛的端基还原为半胱氨酸残基^[20]。二硫键的断裂使羊毛织物内部结构稳定性减弱,碱溶解度增加,羊毛织物内部损伤程度加重。由图 4 可以看出,经 L-半胱氨酸整理后的织物碱溶解度增加至 8.67%,单独漆酶或阿魏酸修复效果较弱,漆酶催化阿魏酸交联织物的碱溶解度减小至 5.82%。由

此证明,阿魏酸寡聚物的吸附或交联对羊毛化学形态的稳定性有积极作用^[21-22]。

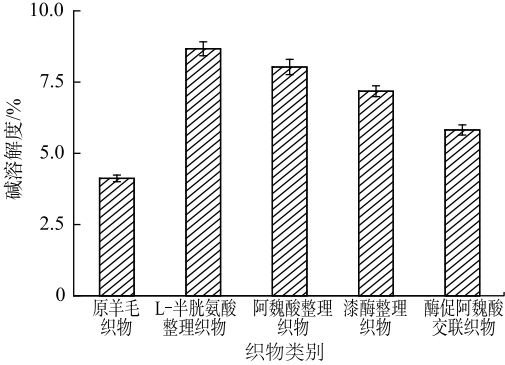


图 4 漆酶催化阿魏酸交联对羊毛织物碱溶解度的影响
Fig. 4 Effect of laccase-catalyzed ferulic acid cross-linking on alkali solubility of wool fabrics

2.2.4 漆酶催化阿魏酸交联对羊毛织物透气、透湿性的影响 羊毛织物洗涤后产生毡缩,从而影响织物的透气、透湿性,洗涤次数对羊毛织物透气、透湿性能的影响如图 5 所示。

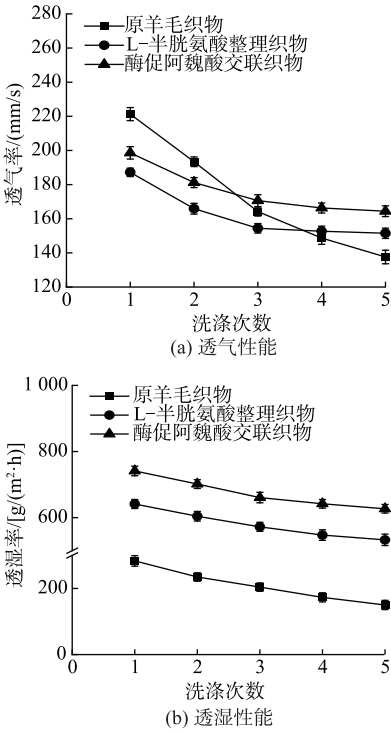


图 5 经不同处理后洗涤次数对羊毛织物透气、透湿性能的影响
Fig. 5 Effect of the washing times after different treatments on the air and moisture permeability of wool fabrics

由图 5 可以看出,随着洗涤次数的增加,原羊毛织物透气性下降较为明显,这是因为湿热环境以及挤压揉搓后,纤维之间缝隙减小,织物结构紧密度增加。经 L-半胱氨酸防毡缩处理后的织物因表面鳞片层被剥离导致织物定向摩擦效应减小,因此

洗涤次数对其透气、透湿性的影响较小。阿魏酸自身具有的羧基为亲水基团,在漆酶的催化作用下,阿魏酸聚合物链段接枝到羊毛纤维上可增加织物的亲水性,从而提升织物透湿性^[23]。

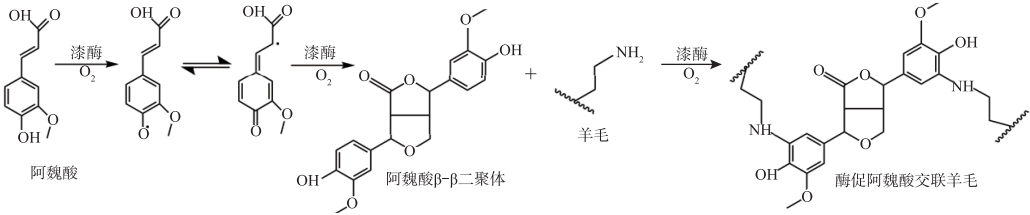


图 6 漆酶催化阿魏酸交联羊毛织物机理

Fig. 6 Mechanism of wool fabric cross-linking with ferulic acid catalyzed by laccase

阿魏酸、阿魏酸聚合物和羊毛织物的红外光谱如图 7 所示。

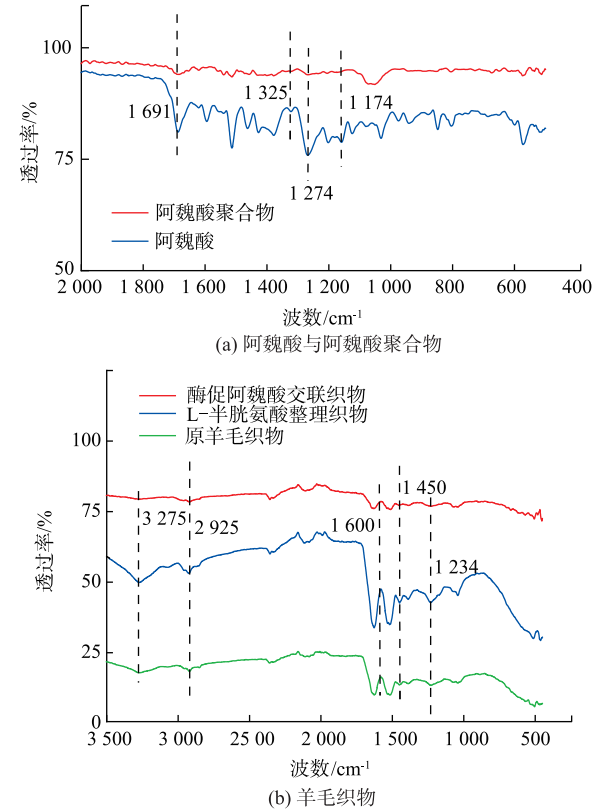


图 7 不同处理条件下的红外光谱

Fig. 7 Infrared spectra under different treatment conditions

由图 7(a)可以看出,在 $1\,325\text{ cm}^{-1}$ 处阿魏酸聚合物羧基中 O—H 面内弯曲振动吸收峰几乎消失,代表羧基含量减少; $1\,274\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,174\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰强度减弱,说明漆酶催化阿魏酸形成的自由基通过 $\text{C}=\text{C}$ 的亲核加成反应形成 $\beta\text{-}\beta$ 连接的自聚物^[24]。

通过红外光谱分析不同处理方法下毛织物的结构,结果如图 7(b)所示。由图 7(b)可以看出,位于 $2\,925\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰由苯环上不饱和 C—H 伸

缩引起,位于 $1\,234\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰由酰胺 III 带 C—N 伸缩引起。与原羊毛织物相比,酶促阿魏酸交联织物在 $3\,275\text{ cm}^{-1}$ 处氨基的吸收峰减弱^[25],说明羊毛的氨基在漆酶催化下与阿魏酸二聚体发生迈克尔加成反应,从而产生交联。

2.2.5 漆酶催化阿魏酸交联羊毛机理分析 图 6 为漆酶催化阿魏酸交联羊毛织物的机理。漆酶在有氧环境下催化阿魏酸形成 $\beta\text{-}\beta$ 二聚体后,与羊毛表面氨基通过迈克尔加成反应产生交联。

2.2.6 漆酶催化阿魏酸交联对羊毛织物热稳定性的影响 热重分析(thermogravimetric analysis, TGA)曲线可以说明漆酶催化阿魏酸交联羊毛植物的热裂解行为,结果如图 8 所示。

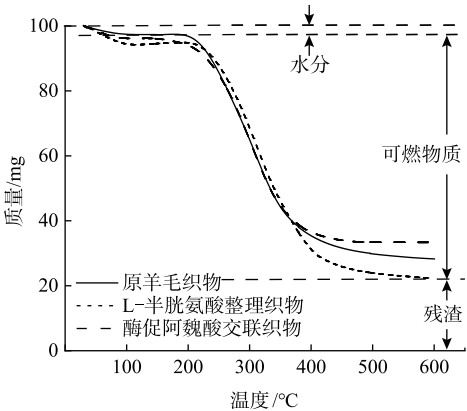


图 8 经不同处理后羊毛织物的 TGA 曲线

Fig. 8 TGA curve of wool fabrics after different treatments

羊毛织物的失重过程分为水分蒸发、羊毛自身热裂解、羊毛热解后的碳化 3 个阶段^[26]。温度低于 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,质量变化主要因为吸附的水分从羊毛织物中脱去,所以质量损失较小;温度为 $200\sim 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,羊毛织物持续减重,这是由蛋白质结构的分解以及氢键的断裂引起,同时发生了胱氨酸残基的分解以及末端氨基酸的脱羧反应^[27]。此阶段原羊毛、L-半胱氨酸处理羊毛、酶促交联羊毛的质量损失分别为 $63\%, 69\%, 60\%$;温度高于 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,羊毛纱线的碳化和烧焦残渣氧化使织物质量进一步减小,存留残渣率分别为 $29\%, 23\%, 33\%$,说明酶促交联使羊毛织物结构的稳定性提高。

2.2.7 羊毛织物表面形貌分析 采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察预处理及酶促处理后羊毛的表面形貌变化,结果如图9所示。由图9可以看出,原羊毛拥有清晰的鳞片层且表面光滑;经L-半胱氨酸处理后,羊毛织物鳞片层被破坏,结构完整性降低,表明L-半胱氨酸整理使纤维内部的二硫键断裂,导致鳞片层部分受损并脱落;经过酶促交联后羊毛表面有颗粒沉积,其中分布在羊毛织物表面的颗粒状物质为阿魏酸低聚物,表明阿魏酸在漆酶催化作用下与羊毛纤维表面发生反应,但寡聚物在纤维表面过多沉积与覆盖,会影响织物的手感与力学性能。

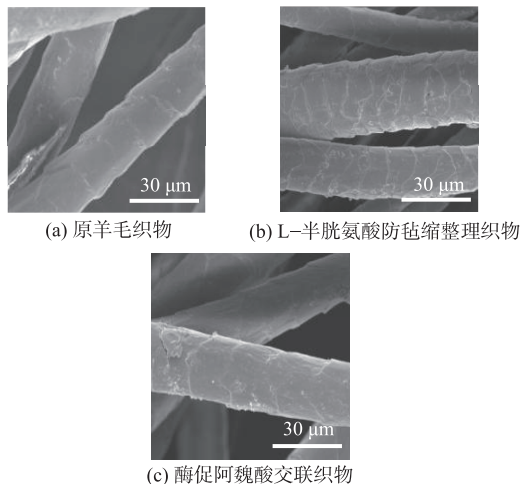


图9 不同处理工艺后羊毛织物的SEM形貌

Fig.9 SEM morphology of wool fabrics after different treatment processes

3 结 语

文中对羊毛织物进行L-半胱氨酸预处理和酶促交联整理,得到以下结论:

1) L-半胱氨酸可以使羊毛纤维外表面鳞片层产生剥落,使毡缩率达到6.84%,但断裂强力经向损失34.77%,纬向损失32.81%。酶促阿魏酸交联可以在保证织物防毡缩性能下,在羊毛织物结构内部产生交联网络,从而使断裂强力损伤经向修复14.21%,纬向修复13.54%。

2) 漆酶催化阿魏酸交联L-半胱氨酸防毡缩整理羊毛织物在有效改善织物防毡缩性能的同时,一定程度上提升了织物的结构稳定性以及洗涤透气、透湿性,在羊毛多功能整理方面具有潜在的应用价值。

参考文献:

[1] 余佳文,丁艳然,张佩华,等. 基于正交实验优选涤纶/羊毛针织物吸湿速干性的工艺参数[J]. 服装学报,

2023,8(3):223-228.

YU Jiawen, DING Yanran, ZHANG Peihua, et al. Optimization of process parameters for moisture absorption and quick drying of polyester/wool knitted fabrics by orthogonal test[J]. Journal of Clothing Research, 2023, 8(3): 223-228. (in Chinese)

[2] 沈之懿. 羊毛织物生物酶/等离子体处理比较及羊毛复合织物洗后性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2022.

[3] 沈玉如, 朱若英, 许恩慧, 等. 羊毛生态防缩新技术探索与研究[J]. 针织工业, 2022(10): 28-32.

SHEN Yuru, ZHU Ruoying, XU Enhui, et al. Exploration and research of new ecological wool fiber anti-felting technology[J]. Knitting Industries, 2022(10): 28-32. (in Chinese)

[4] 陈菡冰, 占繆祥, 王高军, 等. 不同防缩处理对精纺毛织物手感的影响[J]. 毛纺科技, 2020, 48(11): 33-36.

CHEN Hanbing, ZHAN Liuxiang, WANG Gaojun, et al. Effect of different anti-felting process on characters of worsted fabrics[J]. Wool Textile Journal, 2020, 48(11): 33-36. (in Chinese)

[5] RANI S, KADAM V, ROSE N M, et al. Wheat starch, gum Arabic and chitosan biopolymer treatment of wool fabric for improved shrink resistance finishing[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 163: 1044-1052.

[6] 姚科廷, 刘颖, 王强, 等. 基于菠萝蛋白酶的羊毛生物酶法防毡缩整理[J]. 丝绸, 2024, 61(10): 79-87.

YAO Keting, LIU Ying, WANG Qiang, et al. Bio-enzymatic anti-felting finishing of wool based on bromelain[J]. Journal of Silk, 2024, 61(10): 79-87. (in Chinese)

[7] 常雪宁, 何海波, 王依辰, 等. 羊毛角蛋白融合型丝素蛋白膜材料的性能分析[J]. 丝绸, 2023, 60(12): 28-35.

CHANG Xuening, HE Haiibo, WANG Yichen, et al. Performance analysis of fibroin membrane materials mixed with wool keratin[J]. Journal of Silk, 2023, 60(12): 28-35. (in Chinese)

[8] 李佳颖, 沈艳琴, 武海良, 等. L-半胱氨酸/蛋白酶对羊毛防缩整理效果研究[J]. 针织工业, 2023(2): 40-45.

LI Jiaying, SHEN Yanqin, WU Hailiang, et al. Study on the effect of L-cysteine/protease on wool shrink-proof finishing[J]. Knitting Industries, 2023(2): 40-45. (in Chinese)

[9] 赵浦岐, 徐鹏, 张星, 等. 聚多巴胺/蛋白酶对羊毛防缩性能的影响[J]. 上海纺织科技, 2023, 51(8): 39-42.

ZHAO Puqi, XU Peng, ZHANG Xing, et al. Effect of

- polydopamine/protease on the anti-shrinkage properties of wool [J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2023, 51(8): 39-42. (in Chinese)
- [10] MEI J X, ZHANG N, YU Y Y, et al. A novel "trifunctional protease" with reducibility, hydrolysis, and localization used for wool anti-felting treatment [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2018, 102 (21): 9159-9170.
- [11] 飞中琳, 王炜, 俞丹. 基于点击化学的羊毛耐久防毡缩抗起毛起球整理 [J]. 印染, 2017, 43 (19): 1-5, 10.
- FEI Zhonglin, WANG Wei, YU Dan. Durable antifelting and antipilling finishing of wool fabrics based on click chemistry [J]. Dyeing and Finishing, 2017, 43 (19): 1-5, 10. (in Chinese)
- [12] 骆坚城, 栾文辉, 余圆圆, 等. 基于角蛋白酶-蛋白酶协同增效的酶法羊毛防缩加工 [J]. 毛纺科技, 2023, 51(9): 43-50.
- LUO Jiancheng, LUAN Wenhui, YU Yuanyuan, et al. Enzymatic anti-felting processing of wool based on keratin-protease synergism [J]. Wool Textile Journal, 2023, 51 (9): 43-50. (in Chinese)
- [13] 欧标缩水率测试机试验:ISO 6330[S]. 香港:标准集团(香港)有限公司, 2021.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 纺织品 织物拉伸性能 第1部分:断裂强力和断裂伸长率的测定:GB/T 3923.1—2013[S]. 北京:中国标准出版社, 2014.
- [15] 国家技术监督局. 纺织品 织物透气性的测定:GB/T 5453—1997[S]. 北京:中国标准出版社, 1997.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 纺织品 织物透湿性试验方法 第2部分:蒸发法:GB/T 12704.2—2009[S]. 北京:中国标准出版社, 2010.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 羊毛 在碱中溶解度的测定:GB/T 7571—2008[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
- [18] HASSAN M M, CARR C M. A review of the sustainable methods in imparting shrink resistance to wool fabrics [J]. Journal of Advanced Research, 2019, 18: 39-60.
- [19] JIA W N, WANG Q, FAN X, et al. Laccase-mediated dye-free coloration of wool fabric [J]. Indian Journal of Fibre and Textile Research, 2018, 43: 224-230.
- [20] 李洁. 漆酶催化酚类化合物对羊毛性能的改善研究 [D]. 无锡:江南大学, 2022.
- [21] 孙莎莎. 酶促酚类化合物聚合及其对纺织品的功能改性和染色 [D]. 苏州:苏州大学, 2013.
- [22] 陈秋霖, 朱秋昱, 周芳雨, 等. 生物酶辅助提取橘皮色素及其对羊绒染色的性能 [J]. 现代纺织技术, 2024, 32(3): 73-80.
- CHEN Qiulin, ZHU Qiuyu, ZHOU Fangyu, et al. Bio-enzyme-assisted extraction of orange peel pigments and their cashmere dyeing properties [J]. Advanced Textile Technology, 2024, 32(3): 73-80. (in Chinese)
- [23] 韦春花, 张弛, 易敏, 等. 漆酶-TEMPO 生物工艺对羊毛织物表面改性的研究 [J]. 嘉兴学院学报, 2022, 34 (6): 48-53.
- WEI Chunhua, ZHANG Chi, YI Min, et al. A study on surface modification of wool fabric by the laccase-TEMPO bio-process [J]. Journal of Jiaxing University, 2022, 34 (6): 48-53. (in Chinese)
- [24] ADELAKUN O E, KUDANGA T, PARKER A, et al. Laccase-catalyzed dimerization of ferulic acid amplifies antioxidant activity [J]. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic, 2012, 74(1/2): 29-35.
- [25] HECK T, FACCIO G, RICHTER M, et al. Enzyme-catalyzed protein crosslinking [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 97(2): 461-475.
- [26] SEBASTIAN S, SUNDARAGANESAN N, MANOHARAN S. Molecular structure, spectroscopic studies and first-order molecular hyperpolarizabilities of ferulic acid by density functional study [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2009, 74(2): 312-323.
- [27] HASSAN M M, SCHIERMEISTER L, STAIGER M P. Sustainable production of carbon fiber: effect of cross-linking in wool fiber on carbon yields and morphologies of derived carbon fiber [J]. ACS Sustainable Chemistry and Engineering, 2015, 3(11): 2660-2668.

(责任编辑:沈天琦)