

# 牦牛绒纤维的生物酶脱色工艺研究

李思思, 罗秋兰\*, 邹俊浩, 杨永威, 孙 娴, 陈 昊, 朱慧冕

嘉兴南湖学院, 浙江 嘉兴

收稿日期: 2022年7月1日; 录用日期: 2022年8月31日; 发布日期: 2022年9月7日

## 摘 要

采用木瓜蛋白酶、过氧化氢酶对牦牛绒纤维进行剥鳞和漂白脱色处理, 通过正交实验法和综合平衡法, 探究酶浓度、温度、时间对牦牛绒纤维脱色效果的影响。结果表明, 最佳处理工艺为: 过氧化氢酶浓度 7.5% (o.w.f)、温度 60°C、时间 100 min、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 4.2 mL, 此时牦牛绒脱色后各方面的性能均比较好。与传统氧化 - 还原法对比, 经过生物酶脱色处理后牦牛绒纤维的白度从 0.2 上升至 4.2, 断裂强力从 20.12 cN 减少至 13.32 cN, 重量损失率为 5.01%, 比传统氧化 - 还原法处理的强力高, 手感柔软, 白度略微低一些, 但不影响后续生产加工。

## 关键词

牦牛绒, 生物酶, 剥鳞, 漂白脱色

# Study on Biological Enzyme Decolorization Technology of Yak Wool Fiber

Sisi Li, Qiulan Luo\*, Junhao Zou, Yongwei Yang, Xian Sun, Hao Chen, Huimian Zhu

Jiaxing Nanhu University, Jiaxing Zhejiang

Received: Jul. 1<sup>st</sup>, 2022; accepted: Aug. 31<sup>st</sup>, 2022; published: Sep. 7<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Papain and catalase were used to scale and bleach yak wool fiber, the effects of enzyme concentration, temperature and time on the bleach decolorization of yak wool fiber were investigated by orthogonal experiment and comprehensive equilibrium method. The results showed that the optimum process was as follows: catalase concentration 7.5% (o.w.f), temperature 60°C, time 100 min, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 4.2 mL, the performance of yak hair after decolorization was relatively better at present.

\*通讯作者。

文章引用: 李思思, 罗秋兰, 邹俊浩, 杨永威, 孙娴, 陈昊, 朱慧冕. 牦牛绒纤维的生物酶脱色工艺研究[J]. 生物过程, 2022, 12(3): 176-185. DOI: 10.12677/bp.2022.123020

Compared with the traditional oxidation-reduction method, the whiteness of yak wool fibers increased from 0.2 to 4.2 and the breaking strength decreased from 20.12 cN to 13.32 cN after the enzymedecolorization treatment, with a weight loss ratio of 5.01%, which was higher than that of the traditional oxidation-reduction method treatment, with soft hands and slightly lower whiteness, but did not affect the subsequent production processing.

## Keywords

Yak Wool, Biological Enzyme, Scale Stripping, Bleaching Decolorization

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

随着市场上对高档面料的要求逐步提高,羊毛、羊绒制品无法满足当前市场的大规模需求。牦牛绒作为我国特有的天然动物绒毛纤维之一,光泽柔和、手感糯滑,因其髓质层含量少[1],比传统毛纺织产品更加保暖、蓬松性能好、耐起毛起球,是近些年来毛纺工业生产中不可或缺的特种动物毛纤维[2] [3]。

相较于羊毛,天然牦牛绒其本身色泽较深,大多呈现黑色、棕色、深褐色等,此类只适用于染制深色产品,在制备浅色的各类毛制品方面受到极大限制[4] [5]。为了扩大牦牛绒纤维产品应用范围,破除毛色暗淡的桎梏,增加其花色品种,毛纺行业一般先要对牦牛绒进行脱色处理,传统化学脱色一般通过“预处理-氧化处理-还原处理”三步法[6],在生产流程中不仅需要化学试剂,而且会产生大量的有色废液。生物酶以其绿色环保、操作方便、节约低耗的特点,逐渐受到行业内外的关注[7]。

因此,本课题采用木瓜蛋白酶与过氧化氢酶复合,对牦牛绒纤维进行剥鳞和漂白脱色,通过正交实验法得到生物酶脱色的最佳工艺,并与传统脱色后牦牛绒的白度、断裂强度效果进行对比,为开发高品质、高附加值牦牛绒制品做一些有益的探索。

## 2. 实验部分

### 2.1. 材料与仪器

材料:牦牛绒纤维

试剂:混合磷酸盐、氨水、乙酸、亚硫酸氢钠、焦硫酸钾、过氧化氢、保险粉、柠檬酸,以上试剂均为分析纯。木瓜蛋白酶、过氧化氢酶均为工业级。

仪器:CU-2型纤维细度仪、YG(B)003A电子单纤维强力机(温州市大荣纺织仪器有限公司)、WSB-3A白度计(上海昕瑞仪器仪表有限公司)、CP114电子天平(上海上天精密仪器有限公司)、HH-6恒温水浴锅(江苏金坛荣华仪器制造有限公司)、DHG-9075A鼓风干燥箱(上海天呈实验仪器制造有限公司)。

其他仪器还包括:烧杯、量筒、玻璃棒、移液管、滴管、蒸发皿等。

### 2.2. 实验内容

#### 2.2.1. 生物酶法脱色工艺

生物酶脱色工艺流程:预处理→水洗→木瓜蛋白酶剥鳞→水洗→烘干→过氧化氢酶催化漂白→水洗→烘干。

1) 预处理: 主要是对牦牛绒原料进行分类, 分离出牦牛绒和牦牛毛, 同时除去牦牛绒中混有的杂草、砂砾、其他纤维丝等异物。

2) 剥鳞: 采用木瓜蛋白酶对牦牛绒进行处理, 在 6% (o.w.f) 的木瓜蛋白酶中加入 pH 为 6.86、25℃ 的磷酸盐缓冲液, 浴比 1:30, 在温度 30℃ 处理 60 min 后, 将完成剥鳞的牦牛绒用清水充分清洗, 然后在 80℃ 烘干。

3) 催化漂白: 采用  $\text{Fe}^{2+}$  进行络合催化, 配置一定浓度的柠檬酸、 $\text{FeSO}_4$ 、NaCl 溶液, 浴比 1:30, 采用过氧化氢酶对牦牛绒进行漂白, 通过探讨过氧化氢酶浓度、漂白时间、漂白温度、 $\text{H}_2\text{O}_2$  用量 4 个因素, 各取 5 个水平, 通过正交表设计出共 25 组实验, 从而确定最佳过氧化氢酶漂白工艺。正交表影响因素水平表如表 1 所示, 正交实验设计表如表 2 所示。

**Table 1.** Factor levels of yak wool treated with catalase

**表 1.** 过氧化氢酶处理牦牛绒因素水平表

水平	时间/min	温度/℃	酶浓度/%	$\text{H}_2\text{O}_2$ /mL
1	20 (1)	20 (1)	0 (1)	2.2
2	40 (2)	30 (2)	2.5 (2)	2.7
3	60 (3)	40 (3)	5 (3)	3.2
4	80 (4)	50 (4)	7.5 (4)	3.7
5	100 (5)	60 (5)	10 (5)	4.2

**Table 2.** Orthogonal experimental design table

**表 2.** 正交实验设计表

试验号	时间/min	空列	温度/℃	空列	酶浓度/%	$\text{H}_2\text{O}_2$ /mL	试验方案
1	20	1	20	1	0	2.2	$A_1B_1C_1D_1$
2	20	2	30	2	2.5	2.7	$A_1B_2C_2D_2$
3	20	3	40	3	5	3.2	$A_1B_3C_3D_3$
4	20	4	50	4	7.5	3.7	$A_1B_4C_4D_4$
5	20	5	60	5	10	4.2	$A_1B_5C_5D_5$
6	40	1	30	3	7.5	4.2	$A_2B_2C_4D_5$
7	40	2	40	4	10	2.2	$A_2B_3C_5D_1$
8	40	3	50	5	0	2.7	$A_2B_4C_1D_2$
9	40	4	60	1	2.5	3.2	$A_2B_5C_2D_3$
10	40	5	20	2	5	3.7	$A_2B_1C_3D_4$
11	60	1	40	5	2.5	3.7	$A_3B_3C_2D_4$
12	60	2	50	1	5	4.2	$A_3B_4C_3D_5$
13	60	3	60	2	7.5	2.2	$A_3B_5C_4D_1$
14	60	4	20	3	10	2.7	$A_3B_1C_5D_2$
15	60	5	30	4	0	3.2	$A_3B_2C_1D_3$
16	80	1	50	2	10	3.2	$A_4B_4C_5D_3$
17	80	2	60	3	0	3.7	$A_4B_5C_1D_4$

Continued

18	80	3	20	4	2.5	4.2	A <sub>4</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>5</sub>
19	80	4	30	5	5	2.2	A <sub>4</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub> D <sub>1</sub>
20	80	5	40	1	7.5	2.7	A <sub>4</sub> B <sub>3</sub> C <sub>4</sub> D <sub>2</sub>
21	100	1	60	4	5	2.7	A <sub>5</sub> B <sub>5</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub>
22	100	2	20	5	7.5	3.2	A <sub>5</sub> B <sub>1</sub> C <sub>4</sub> D <sub>3</sub>
23	100	3	30	1	10	3.7	A <sub>5</sub> B <sub>2</sub> C <sub>5</sub> D <sub>4</sub>
24	100	4	40	2	0	4.2	A <sub>5</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>5</sub>
25	100	5	50	3	2.5	2.2	A <sub>5</sub> B <sub>4</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>

### 2.2.2. 传统化学脱色法

传统化学脱色法采用氧化 - 还原优化工艺, 具体试验方案为:

预处理阶段: FeSO<sub>4</sub> 15% (owf), NaHSO<sub>3</sub> 3 g/L, 浴比 1:40, 温度 40℃, 处理时间 40 min;

氧化漂白阶段: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30%) 25 g/L, 焦磷酸钠 8 g/L, 浴比 1:40, 温度 50℃, 漂白时间 120 min;

还原漂白阶段: 保险粉 1 g/L, 焦磷酸钠 2 g/L, 浴比 1:40, 温度 50℃, 还原时间 60 min。

### 2.3. 性能测试

采用 CU-2 型纤维细度仪对生物酶处理前后牦牛绒纤维的外观形貌结构进行分析; 采用 YG(B)003A 型电子单纤维强力机上测定纤维的拉伸强力和断裂伸长, 多次重复, 取平均值; 在 WSB-3A 型白度仪上测试纤维的白度, 多次重复, 取平均值; 通过精密型电子天平, 称取称量剥鳞、脱色前后纤维样品的重量, 计算出重量损失率。

## 3. 实验结果与讨论

### 3.1. 木瓜蛋白酶处理前后牦牛绒纤维的结构与性能

#### 3.1.1. 木瓜蛋白酶处理前后牦牛绒纤维的外观结构

通过显微镜放大 40 倍后, 观察牦牛绒单根纤维在木瓜蛋白酶处理前后的外观结构, 具体如图 1 所示。



**Figure 1.** Appearance structure of fibers before and after papain treatment at 40X magnification (left: before scaling treatment; right: after scaling treatment)

**图 1.** 放大 40 倍木瓜蛋白酶处理前后纤维的外观结构(左: 剥鳞处理前; 右: 剥鳞处理后)

从图中可以看出, 纤维的外观结构变化不是特别明显, 但处理后纤维表面的鳞片稀疏, 变得较为平阔, 张角变大, 而且紧贴于毛干, 这使纤维相对较光滑, 而且也有利于后期生物酶对牦牛绒纤维的漂白脱色。

### 3.1.2. 木瓜蛋白酶处理前后牦牛绒纤维的各项性能

采用木瓜蛋白酶对牦牛绒进行剥鳞处理前后, 纤维的各项性能指标如表 3 所示。

**Table 3.** Fiber properties of yak wool before and after treatment with papain

**表 3.** 木瓜蛋白酶对牦牛绒剥鳞处理前后的纤维性能

样品	性能指标			
	断裂强力/cN	断裂伸长/mm	纤维白度值/	重量损失率/%
剥鳞处理前	20.12	5.50	0.2	0
剥鳞处理后	16.22	4.79	1.5	4.33

从表 3 中可以看出, 剥鳞处理使得单纤维的断裂强力发生了下降, 下降率为 19.38%, 断裂伸长也略微变化, 但是纤维的白度有明显提升, 白度值从 0.2 上升至 1.5, 说明生物酶在对纤维表面的鳞片层进行作用的同时, 也与蛋白质纤维中的部分色素发生作用, 使得纤维白度有所提升。此外, 通过生物酶的作用, 纤维表面的鳞片部分产生剥离, 所以纤维的重量发生了一定程度的降低, 重量损失率约为 4.33%。

## 3.2. 过氧化氢酶处理的最佳工艺探讨

### 3.2.1. 过氧化氢酶处理对牦牛绒纤维力学性能的影响

为了得到最优方案, 以断裂强力为评价指标, 对正交实验结果进行计算与分析, 具体结果见表 4 所示。

**Table 4.** Orthogonal table of breaking strength of yak wool fibers treated with catalase

**表 4.** 过氧化氢酶处理后牦牛绒纤维的断裂强力正交表

试验号	因素						
	时间/min	空列	温度/°C	空列	酶浓度/%	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /mL	断裂强力/cN
2	20	2	30	2	2.5	2.7	12.93
3	20	3	40	3	5	3.2	12.46
4	20	4	50	4	7.5	3.7	12.38
5	20	5	60	5	10	4.2	12.27
6	40	1	30	3	7.5	4.2	11.47
7	40	2	40	4	10	2.2	12.93
8	40	3	50	5	0	2.7	12.84
9	40	4	60	1	2.5	3.2	12.27
10	40	5	20	2	5	3.7	11.47
11	60	1	40	5	2.5	3.7	12.93
12	60	2	50	1	5	4.2	12.84
13	60	3	60	2	7.5	2.2	12.46
14	60	4	20	3	10	2.7	12.38
15	60	5	30	4	0	3.2	12.93
16	80	1	50	2	10	3.2	13.60

## Continued

17	80	2	60	3	0	3.7	12.46
18	80	3	20	4	2.5	4.2	13.76
19	80	4	30	5	5	2.2	14.89
20	80	5	40	1	7.5	2.7	10.93
21	100	1	60	4	5	2.7	11.32
22	100	2	20	5	7.5	3.2	15.77
23	100	3	30	1	10	3.7	14.96
24	100	4	40	2	0	4.2	14.44
25	100	5	50	3	2.5	2.2	13.47
K1	61.51	66.93	68.64	62.62	66.03	64.27	
K2	62.44	66.48	64.36	63.7	66.85	64.75	
K3	64.21	66.36	62.85	67.19	64.47	64.87	
K4	63.36	61.07	64.65	69.37	63.86	66.24	
K5	73.83	64.51	64.85	62.47	64.14	65.22	
R	12.32	5.86	5.79	6.9	2.99	1.97	
因素主次	A > B > C > D						
优方案	A5 B1 C2 D5						

由表 4 可以看出：影响牦牛绒力学性能的因素主次顺序为：时间 > 温度 > 过氧化氢酶浓度大于过氧化氢用量，即温度越高，牦牛绒纤维的断裂强力越好。因此，过氧化氢酶漂白牦牛绒纤维以断裂强力为结果指标时，最优方案为 A5B1C2D5，即温度 60℃，时间为 20 min，过氧化氢酶 2.5% (o.w.f)，过氧化氢含量 4.2 mL。

### 3.2.2. 过氧化氢酶处理对牦牛绒纤维白度的影响

过氧化氢酶处理前后牦牛绒纤维的白度结果如表 5 所示。

**Table 5.** Orthogonal table of whiteness of yak wool fibers treated with catalase

**表 5.** 过氧化氢酶处理后牦牛绒白度正交表

试验号	因素						白度
	时间/min	空列	温度/℃	空列	酶浓度/%	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /mL	
1	20	1	20	1	0	2.2	2.36
2	20	2	30	2	2.5	2.7	2.35
3	20	3	40	3	5	3.2	2.34
4	20	4	50	4	7.5	3.7	2.35
5	20	5	60	5	10	4.2	2.36
6	40	1	30	3	7.5	4.2	2.35
7	40	2	40	4	10	2.2	2.35
8	40	3	50	5	0	2.7	2.35

Continued

9	40	4	60	1	2.5	3.2	2.36
10	40	5	20	2	5	3.7	2.35
11	60	1	40	5	2.5	3.7	2.35
12	60	2	50	1	5	4.2	2.34
13	60	3	60	2	7.5	2.2	2.41
14	60	4	20	3	10	2.7	2.34
15	60	5	30	4	0	3.2	2.35
16	80	1	50	2	10	3.2	2.36
17	80	2	60	3	0	3.7	2.40
18	80	3	20	4	2.5	4.2	2.37
19	80	4	30	5	5	2.2	2.36
20	80	5	40	1	7.5	2.7	2.37
21	100	1	60	4	5	2.7	2.40
22	100	2	20	5	7.5	3.2	2.39
23	100	3	30	1	10	3.7	2.39
24	100	4	40	2	0	4.2	2.39
25	100	5	50	3	2.5	2.2	2.40
K1	11.76	11.82	11.81	11.82	11.85	11.88	
K2	11.76	11.83	11.8	11.86	11.83	11.81	
K3	11.79	11.86	11.8	11.83	11.79	11.8	
K4	11.86	11.8	11.8	11.82	11.87	11.84	
K5	11.97	11.83	11.93	11.81	11.8	11.81	
R	0.21	0.06	0.13	0.05	0.08	0.08	
因素主次	A > B > C > D						
优方案	A5 B5 C4 D1						

由表 5 可以看出：影响白度的因素主次顺序为：时间 > 温度 > 过氧化氢酶浓度 > 过氧化氢用量。在实验中，时间因素影响最大，即时间越久，牦牛绒纤维的白度越好。因此，过氧化氢酶漂白牦牛绒纤维以白度为结果指标时，最优方案为 A5B5C4D1，即时间 100 min，温度 60℃，过氧化氢酶 7.5% (o.w.f)，过氧化氢 2.2 mL。

### 3.2.3. 过氧化氢酶整理对牦牛绒重量的影响

以重量损失率为评价指标，对正交实验结果进行计算与分析，具体结果见表 6 所示。

由表 6 可以看出：影响重量损失的因素主次顺序为：温度 > 过氧化氢酶浓度 > 时间 > 过氧化氢含量，温度在测试实验中影响最大，则温度越高，牦牛绒纤维的重量损失越大。因此，以重量损失率为结果指标时，最优方案为 A3D3B4C4，即温度 40℃，过氧化氢酶 3.2% (o.w.f)，时间为 80 min，过氧化氢含量 7.5 mL。

**Table 6.** Orthogonal table of weight loss of yak wool fibers treated with catalase  
**表 6.** 过氧化氢酶处理牦牛绒纤维后重量损失正交表

试验号	因素						
	时间/min	空列	温度/°C	空列	酶浓度/%	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /mL	重量损失率/%
1	20	1	20	1	0	2.2	4.00
2	20	2	30	2	2.5	2.7	4.00
3	20	3	40	3	5	3.2	5.00
4	20	4	50	4	7.5	3.7	8.00
5	20	5	60	5	10	4.2	5.00
6	40	1	30	3	7.5	4.2	4.00
7	40	2	40	4	10	2.2	4.00
8	40	3	50	5	0	2.7	5.00
9	40	4	60	1	2.5	3.2	8.00
10	40	5	20	2	5	3.7	5.00
11	60	1	40	5	2.5	3.7	4.00
12	60	2	50	1	5	4.2	8.00
13	60	3	60	2	7.5	2.2	9.00
14	60	4	20	3	10	2.7	10.00
15	60	5	30	4	0	3.2	10.00
16	80	1	50	2	10	3.2	6.00
17	80	2	60	3	0	3.7	5.00
18	80	3	20	4	2.5	4.2	6.00
19	80	4	30	5	5	2.2	5.00
20	80	5	40	1	7.5	2.7	5.00
21	100	1	60	4	5	2.7	5.00
22	100	2	20	5	7.5	3.2	5.00
23	100	3	30	1	10	3.7	6.00
24	100	4	40	2	0	4.2	5.00
25	100	5	50	3	2.5	2.2	5.00
K1	26	26	29	28	29	29	
K2	15	15	15	15	15	10	
K3	43	36	31	33	31	30	
K4	26	30	32	26	30	28	
K5	26	24	30	31	29	27	
R	28	21	17	18	16	20	
因素主次	A > D > B > C						
优方案	A3 D3 B4 C4						

### 3.2.4. 利用综合平衡法确定生物酶漂白脱色最佳工艺

综合平衡法是指先对单个因素指标采用直观分析法分析,得到每个单指标的极差、主次顺序和优方案,然后再根据不同因素对最终结果影响程度的不同进行综合平衡分析,从而得出最佳工艺[8]。

针对牦牛绒的漂白脱色工艺,根据表 4~6 中得出的结果进行分析比较,可以得出,对于不同指标而言,不同因素的影响程度是不一样的。

温度(因素 A):对于断裂强力而言,因素 A 是最重要的因素,取 A5,不用重点考虑;对于白度而言,因素 A 是最重要的因素,从极差可以得出,取 A5;对于重量损失而言,因素 A 也是最重要的因素,从极差可以得出,取 A3。所以根据多数倾向和 A 因素对不同指标的重要程度,选取 A5。

时间(因素 B):对于断裂强力而言,因素 B 是次重要的因素,根据极差,取 B1;对于白度而言,因素 B 也是次重要的因素,从极差可以看出,取 B5;从重量损失来看因素 B 是较次要的因素,根据极差,取 B4,不用重点考虑。根据多数倾向和 B 因素对不用指标的重要程度,选取 B5。

过氧化氢酶浓度(因素 C):对于断裂强力,因素 C 是较次要的因素,根据极差,取 C2;对于白度指标,因素 C 是较次要的因素,取 C4,不用重点考虑;对于重量损失而言,因素 C 是最次要的因素,取 C4。所以根据因素 C 对不同指标的重要程度,选 C4。

过氧化氢浓度(因素 D):对于断裂强力而言,因素 D 是最次要的因素,取 D5,不用重点考虑;对于白度而言,因素 D 是最次要的因素,根据极差,取 D1;对于重量损失率而言,因素 D 是次重要的因素,从极差可以得出,取 D3。根据多数倾向和 D 因素对不同指标的重要程度,选取 D5。

综上,过氧化氢酶对牦牛绒漂白整理的最佳工艺是 A5B5C4D5,即时间 100 min、温度 60℃、过氧化氢酶 7.5% (o.w.f)、过氧化氢 4.2 mL。

### 3.3. 生物酶脱色工艺与传统化学脱色的纤维性能对比

将最佳工艺下的牦牛绒脱色结果与传统化学氧化还原法进行性能对比,结果如表 7 所示。

**Table 7.** Comparison of fiber properties between biological enzyme decolorization and traditional chemical decolorization  
**表 7.** 生物酶脱色与传统化学脱色后的纤维性能对比

样品	性能	断裂强力/cN	断裂伸长/mm	白度	重量损失率/%	手感
牦牛绒原样		20.12	5.50	0.2	0	柔软
生物酶脱色		13.32	5.76	4.2	5.01%	较柔软
氧化 - 还原脱色		7.89	3.48	6.11	7.98%	一般

与传统化学脱色法对比,生物酶脱色得到的牦牛绒单纤维强力高,重量损失率小,手感较柔软,因此后期加工得到的产品服用性能较好;但是在纤维的白度方面,生物酶脱色的纤维,其白度较低。

分析原因可知:生物酶作用比较温和,在脱色时温度较低,因此对于蛋白质纤维内部的皮质层中黑色素,无法完全去除,导致与传统氧化 - 还原脱色法对比,纤维白度低。而传统化学脱色法处理后虽然纤维的白度较高,但是是以损伤纤维为代价,易造成纤维强力的较大损失,导致后道加工中的制成率和精梳纺纱的可纺性明显降低。

## 4. 结论

1) 采用木瓜蛋白酶对牦牛绒进行剥鳞整理的工艺是可以采用的,经过木瓜蛋白酶处理后牦牛绒纤维的表面鳞片层有一定程度的破坏,白度略有提升,有利于后期的生物酶漂白脱色。

2) 采用正交实验法、综合平衡法, 确定了过氧化氢酶对牦牛绒进行漂白脱色的最佳工艺条件, 即时间 100 min、温度 60℃、过氧化氢酶 7.5% (o.w.f)、过氧化氢 4.2 mL、浴比 1:30。

3) 与传统化学法脱色对比, 最佳工艺下生物酶处理后的牦牛绒纤维, 手感柔软, 强力损失小, 但白度比化学脱色低, 略微较差, 并不影响其后续加工。因此, 这是一种既确保一定白度、又尽可能保护强力的工艺, 在实际生产中具有一定的应用和推广价值。

总之, 生物酶脱色法, 绿色环保, 对环境友好, 是未来纺织领域的一个新的发展方向, 可以在传统化学脱色中进行代替使用, 开发手感柔软的高品质牦牛绒制品, 扩大牦牛绒等有色纤维的应用领域。

## 基金项目

2022 年嘉兴南湖学院国家级大学生创新创业训练计划项目(项目名称: 纺织基 pH 应变传感器的设计及制备); 嘉兴南湖学院 2021 校级 SRT 项目(8517213108、8517211004)。

## 参考文献

- [1] 李蔚, 刘新金, 徐伯俊, 等. 牦牛绒与骆驼绒及羊绒的物理性能对比[J]. 纺织学报, 2015, 36(8): 1-5.
- [2] 章莉莉, 刁秋宇, 张姚真. 牦牛绒材料与传统工艺的创新研发途径[J]. 上海工艺美术, 2021(1): 54-57.
- [3] 殷佳敏, 倪春锋, 刘芬. 驼绒的脱色工艺与优化研究[J]. 毛纺科技, 2016, 44(11): 51-54.
- [4] 邢平. 牦牛绒与驼绒纤维染整加工及其混纺织物性能研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2017.
- [5] 潘佳俊, 夏兆鹏, 张海宝, 等. 牦牛绒过氧化氢/过硫酸铵脱色体系工艺优化及其机制[J]. 纺织学报, 2021, 42(4): 101-106.
- [6] 陈念. 牦牛绒的氧化-还原脱色及再染色研究[J]. 成都纺织高等专科学校学报, 2015, 32(2): 17-25.
- [7] 张东旭, 堵国成, 陈坚. 微生物过氧化氢酶的发酵生产及其在纺织工业的应用[J]. 生物工程学报, 2010, 26(11): 1473-1481.
- [8] 刘婵, 谢春萍, 刘新金, 等. 黑牦牛绒氧化脱色工艺优化及其可纺性[J]. 纺织学报, 2016, 37(7): 49-54.