

废弃羊毛非织造材料开纤工艺研究

张 乐^{a,b} 赵 奕^{a,b}

东华大学 a. 产业用纺织品教育部工程研究中心, b. 上海市现代纺织前沿科学研究基地, 上海 201620

摘要:为实现资源再利用,将废弃羊毛水刺制成的非织造材料预处理后,通过微米级和亚微米级两级开纤处理,制备废弃羊毛基功能非织造材料。探究处理体系固液比、开纤温度、还原时间及 pH 值对羊毛非织造材料原纤结构单元剥离程度和稳定性的影响。结果表明:羊毛结构单元的开纤量随开纤温度、还原时间和 pH 值的升高而增加,随固液比的提高而降低,羊毛非织造材料的结构稳定性随开纤量的提高而降低。经试验得出最佳微米级开纤工艺参数为固液比 1.5:50、温度 50 °C,最佳亚微米级开纤工艺参数为温度 75 °C、还原时间 2.5 h、pH 值 10。

关键词: 废弃羊毛纤维;非织造材料;固液比;开纤温度;还原时间;pH 值;孔径分布;损耗率

中图分类号:TS 171

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2024)07-0027-11

Study on fiber splitting process of waste wool nonwovens

Zhang Le^{a,b}, Zhao Yi^{a,b}

a. Engineering Research Center of Technical Textile, Ministry of Education, b. Shanghai Modern Textile Frontier Science Research Base, Donghua University, Shanghai 201620, China

Abstract: In order to realize the reuse of resources, the waste wool-based functional nonwovens were prepared by micron-level and submicron-level two-stage splitting treatment after pretreatment. The effects of solid-liquid ratio, splitting temperature, reduction time and pH value on the stripping degree and stability of fibril structural units of wool nonwovens were investigated. The results showed that the splitting amount of wool structural unit increased with the increase of splitting temperature, reduction time and pH value, and decreased with the increase of solid-liquid ratio. The structural stability of wool nonwovens decreased with the increase of splitting amount. Through experiments, the results showed that the optimum micron-level splitting process parameters were solid-liquid ratio at 1.5:50, temperature at 50 °C, the optimum submicron-level splitting process parameters were temperature at 75 °C, reduction time at 2.5 h, and pH value at 10.

Keywords: waste wool fiber; nonwoven; solid-liquid ratio; splitting temperature; reduction time; pH value; pore size distribution; loss percentage

收稿日期:2024-03-26

作者简介:张乐,女,2000年生,在读硕士研究生,主要研究方向为羊毛纤维的表面处理

通信作者:赵奕,副教授, zhaoyi@dhu.edu.cn

羊毛是天然的蛋白质纤维,其蛋白质质量分数高达 95%,并富含多种极性基团,具有优异的生物相容性、保暖性和隔热性等^[1-2]。除了制备高品质纺织品外,羊毛的应用还涉及污水处理、生物医用、空气过滤等领域^[3-8]。我国平均年生产 9 万 t 羊毛织物,然而废旧羊毛织物的回收率不到 1%,其余大多被焚烧或填埋,这造成了可再生资源的浪费。若能将羊毛废料转化为高附加值产品,则不仅可以实现资源再利用,还能减少环境污染^[9]。

刘燕等^[10]综述了羊毛废弃物在吸声领域的研究现状,指出在 250~800 Hz 的低频范围内,以羊毛纤维为原料,采用气流成网法制备的特定厚度的非织造吸声材料,其吸声系数较其他天然纤维材料的高。张洪康等^[11]对比了废弃羊毛和原毛的纤维直径、形貌,以及断裂强度等性能指标,并将两者制备成隔热非织造材料进行各项性能对比。结果表明,废弃羊毛隔热非织造材料的断裂强度和撕破强度尽管低于原毛隔热非织造材料,但隔热性能优于原毛隔热非织造材料。冯龙等^[12]选用不同的改性剂对废弃羊毛进行表面去鳞片处理,并探究了改性羊毛对活性染料和弱酸性染料的吸附性能。结果表明,采用单宁酸(TA)-聚乙烯亚胺(PEI)对废弃羊毛进行表面改性时,汽巴克隆 FN-3G 活性染料、Nr-Cosan Red M-2RBL 弱酸性染料可被改性羊毛较好地吸附;当 $m(\text{TA}):m(\text{PEI})=1:1$ 时,改性羊毛对汽巴克

隆 FN-3G 活性染料的吸附率高达 67.7%;当 $m(\text{TA}):m(\text{PEI})=1:2$ 时,改性羊毛对 Nr-Cosan Red M-2RBL 弱酸性染料的吸附率高达 74.2%;经过 3 次吸附-解吸循环后,改性羊毛的吸附性仍能保持原来的 80% 左右。

为提升废弃羊毛在废水治理及空气过滤等领域的应用效率,探索具有潜力的产业化制备工艺,本文将研究高孔隙废弃羊毛非织造材料的制备方法及其结构性能。首先将废弃羊毛通过水刺工艺制备成废弃羊毛非织造材料,然后进行预处理,最后对预处理羊毛非织造材料进行两级开纤处理,探究开纤处理工艺对羊毛非织造材料开纤程度的影响,以使羊毛纤维中的微米级和亚微米级结构单元部分剥离纤维主体,并尽可能多地暴露活性官能团,同时保持材料的结构稳定性,赋予废弃羊毛非织造材料在废水治理(如染料吸附、重金属吸附及油污吸附等)和空气过滤等领域快速、高效、无二次污染的应用特性。

1 试验

1.1 材料与仪器

废弃羊毛非织造材料,面密度为 180 g/m²、体积密度为 9 kg/m³,由纺织厂废弃羊毛(纤维线密度为 9.7 tex)通过水刺工艺加工而成。试验用主要试剂如表 1 所示,试验用主要仪器如表 2 所示。

表 1 试验用主要试剂

Tab. 1 Main reagents for test

名称	规格	生产厂商
甲酸	质量分数为 90%	上海麦克林生化科技有限公司
L-半胱氨酸	质量分数为 99%	上海阿拉丁生化科技股份有限公司
氢氧化钠	化学纯(质量分数为 99%)	上海麦克林生化科技有限公司
石油醚	分析纯(馏分范围在 90~120 ℃)	上海麦克林生化科技有限公司
无水乙醇	分析纯(体积分数≥99.7%)	国药集团化学试剂有限公司

1.2 试样的制备

1.2.1 废弃羊毛非织造材料的预处理

取适量废弃羊毛非织造材料,在超声机中利用石油醚于 25 ℃ 条件下清洗 3 h,然后利用无水乙醇于 60 ℃ 条件下清洗 2 h,最后用去离子水洗净,60 ℃ 烘箱烘干,即得预处理羊毛非织造材料,待用。

1.2.2 微米级开纤处理

(1) 甲酸扩列溶胀:剪取不同质量(0.5、1.0、

1.5、2.0 g)的预处理羊毛非织造材料,放入 50 mL 质量分数为 90%的不同温度(25、50、75、100 ℃)的甲酸中浸泡 10 min。

(2) 超声开纤:将预处理羊毛非织造材料连同甲酸从水浴锅中取出,一起放入超声波细胞粉碎机中,调整超声波探头距烧杯底 1 cm,然后在一定参数(功率 550 W、超声工作时间 1 s、超声间隔时间 1 s)下超声 30 min^[13]。

表 2 试验用主要仪器

Tab. 2 Main instruments for test

仪器名称	型号	生产厂家
电子精密天平	MP110B	上海舜宇恒平科学仪器有限公司
梳理机	FZS-600	常熟伟成非织造成套设备有限公司
水刺机	Aquajet Y500-2	特吕茨施勒公司, 德国
恒温磁力搅拌器	AL104-IC	梅特拓-托利多仪器有限公司
pH 计	PH S3-3C	杭州诺丁科学器材有限公司
电热恒温鼓风干燥箱	DHG-9143BS-III	南宁市林奥仪器有限公司
傅里叶变换红外光谱仪	Spectrum II	PerkinElmer 公司, 美国
超声波细胞粉碎机	BILON-650Y	上海比郎仪器制造有限公司
循环水式多用真空泵	SHZ-D(III)	上海秋佐科学仪器有限公司
扫描电子显微镜(SEM)	TM3000	Hitachi 公司, 日本
孔径分析仪	CFP-1100AI	PMI 公司, 美国

(3) 清洗和烘干: 在真空抽滤机上放置孔径 75 μm (即 200 目) 的不锈钢滤网, 用大量去离子水反复清洗超声开纤处理后的羊毛非织造材料, 清洗干净后置于 60 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中烘干, 即得微米级开纤羊毛非织造材料。

1.2.3 亚微米级开纤处理

(1) 还原体系的制备: 将 0.4 g 的 L-半胱氨酸溶解于 20 mL 的去离子水中, 不断滴加配制的质量分数低于 50% 的 NaOH 溶液, 配制 pH 值分别为 8、9、10、11 和 12 的还原体系。

(2) 还原体系还原: 将烘干后的微米级开纤羊毛非织造材料放入配制的不同 pH 值的还原体系中, 于不同温度 (50、75、100 $^{\circ}\text{C}$) 下浸泡不同时间 (1.0、2.5、7.5、12.5、17.5 h)^[14];

(3) 超声辅助开纤: 将非织造材料连同还原体系一起放入超声波细胞粉碎机中, 在一定参数 (功率 550 W、超声工作时间 1 s、超声间隔时间 1 s) 下超声 1 h;

(4) 清洗和烘干: 在真空抽滤机上放置孔径约 38 μm (即 400 目) 的不锈钢滤网, 用大量去离子水反复清洗超声辅助开纤后的羊毛非织造材料, 清洗干净后置于 60 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中烘干, 即得高孔隙废弃羊毛非织造材料。

1.3 表征及测试

1.3.1 形貌分析

采用 TM3000 型扫描电子显微镜观察羊毛非织造材料不同阶段的表观形貌。

1.3.2 傅里叶红外光谱

采用 Spectrum II 型傅里叶变换红外光谱仪对

不同阶段的羊毛非织造材料进行表征, 并基于官能团特征峰强度判断官能团暴露量。设置扫描范围为 400~4 000 cm^{-1} 。

1.3.3 孔径分布

采用 CFP-1100AI 型孔径分析仪测试不同阶段的羊毛非织造材料的孔径分布状况, 并根据孔径分布状况和最可几孔径间接表征羊毛非织造材料的开纤程度。

1.3.4 损耗率

称取开纤处理前后干燥态羊毛非织造材料的质量 (m_0 和 m_1 , g), 并根据式 (1) 计算开纤处理后羊毛非织造材料的损耗率 (ω , %):

$$\omega = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

2 结果与讨论

2.1 固液比

适宜的预处理羊毛非织造材料质量 (g) 和甲酸体积 (mL) 之比即固液比, 可以实现废弃羊毛的最大化利用。本小节固定溶胀温度为 50 $^{\circ}\text{C}$, 探究最佳固液比。图 1 为不同固液比微米级开纤处理前后羊毛非织造材料的孔径分布状况, 可以看出, 不同固液比微米级开纤处理的羊毛非织造材料其孔径分布有一定区别。固液比为 1.5:50 时, 所得羊毛非织造材料的孔径整体偏小 (为 5~162 μm), 最可几孔径为 20~40 μm , 而其余 3 个固液比条件下得到的羊毛非织造材料的最可几孔径为 40~60 μm , 这说明 1.5:

50 的固液比获得的羊毛非织造材料孔径相对最小, 此条件下微米级开纤程度相对最高。对比图 1a) 和图 1d) 还可以发现, 微米级开纤处理后, 羊毛非织造

材料的孔径范围明显缩小, 最可几孔径也从 500 ~ 550 μm 降至 20 ~ 40 μm 。

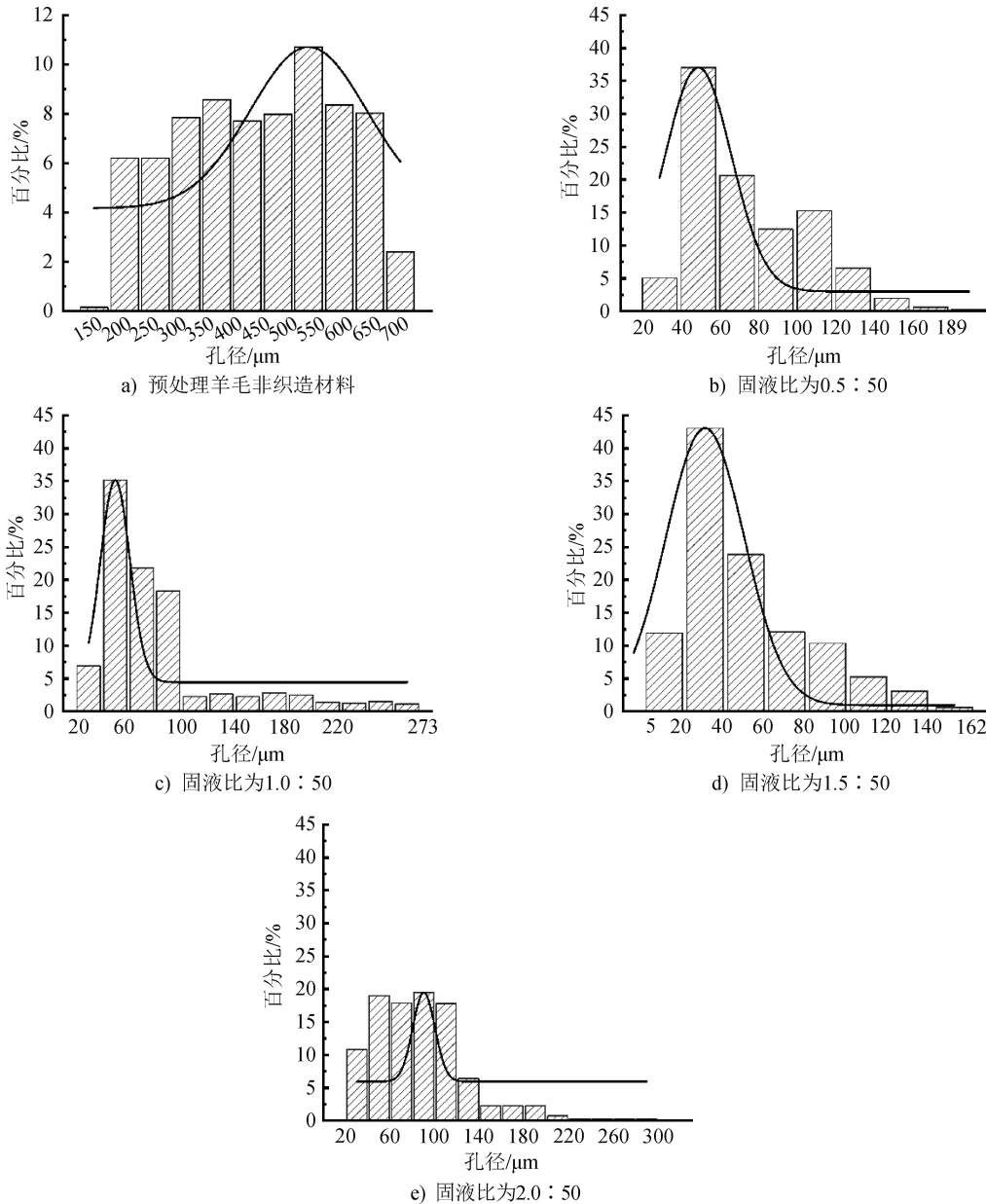


图 1 固液比对羊毛非织造材料孔径分布的影响

Fig. 1 Effect of solid-liquid ratio on pore size distribution of wool nonwovens

图 2 为不同固液比微米级开纤处理前后羊毛非织造材料的红外光谱图。从图 2 可以观察到典型的羊毛肽链吸收带: 3 280 cm^{-1} 处宽而强的吸收带归因于酰胺 I 带—NH 的伸缩振动, 1 630 cm^{-1} 处主要为 C=O 键的伸缩振动, 1 515 cm^{-1} 处的吸收峰主要源于酰胺 II 带 N—H 的弯曲振动, 1 242 cm^{-1} 处的吸收峰主要对应酰胺 III 带 C—N 的伸缩振

动^[15]。微米级开纤处理后, 羊毛非织造材料的红外光谱中未出现新的特征峰, 且其本身各个官能团的吸收峰显著增强, 其中固液比为 1.5 : 50 时所得微米级开纤羊毛非织造材料中各个官能团特征峰强度最大。

甲酸扩列溶胀时, 若预处理羊毛非织造材料占比过高, 则甲酸无法进入全部的纤维结构单元间的

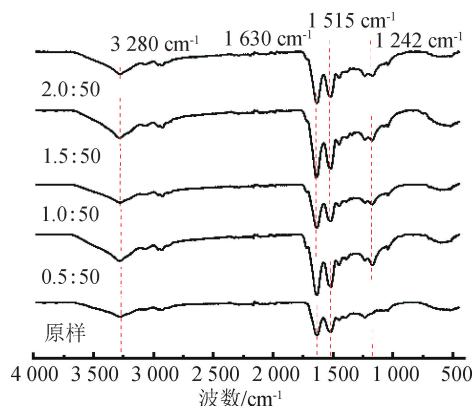


图 2 不同固液比微米级开纤处理前后羊毛非织造材料的红外光谱图

Fig. 2 Infrared spectra of wool nonwovens before and after micron-level fiber splitting treatment under different solid-liquid ratios

基质中,故无法实现大量开纤的效果;相反,若预处理羊毛非织造材料占比过低,则其会被甲酸完全溶胀,这样在机械剪切力的作用下,各级结构单元会被切断,导致无法实现开纤效果。图 3 统计了不同固液比条件下羊毛非织造材料的损耗率,可以看出:固液比为 0.5:50 时羊毛非织造材料的损耗率最高,说明此时羊毛纤维的结构单元已受到损伤;固液比为 2.0:50 时羊毛非织造材料的损耗率最低,但综合孔径分布和官能团暴露量这 2 项指标认为其结构体剥离量不高,这会造成原料的浪费;固液比为 1.5:50 时羊毛非织造材料的官能团暴露量最多,其损耗率也仅在 10% 左右。

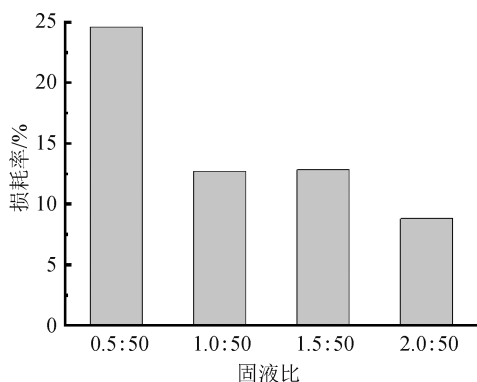


图 3 不同固液比条件下羊毛非织造材料的损耗率

Fig. 3 Loss percentage of wool nonwovens under different solid-liquid ratios

综合考虑孔径分布、官能团暴露量和损耗率,确定微米级开纤处理过程中,预处理羊毛非织造材料和甲酸的最佳固液比为 1.5:50。

2.2 开纤温度

开纤温度升高会加剧分子运动,进而加速甲酸及还原体系对羊毛非织造材料的溶胀和分离作用,故在相同的时间条件下,高温能使结构单元剥离得更彻底。本研究在微米级开纤处理的过程中设置了 4 个溶胀温度——25、50、75、100 °C,在亚微米级开纤处理的过程中设置了 3 个还原温度——50、75、100 °C。本小节将在固液比为 1.5:50 的条件下,对不同开纤温度处理得到的羊毛非织造材料进行多项测试,探究最适宜的开纤温度。

图 4 是不同溶胀温度处理后微米级开纤羊毛非织造材料的扫描电镜照片。从图 4 可以明显观察到,随着溶胀温度的升高,正、副皮质细胞的剥离量明显增多,其中 100 °C 溶胀温度处理后可观察到纤维主体被密密麻麻的纺锤形结构体所覆盖。

开纤温度对羊毛非织造材料开纤效果的影响可利用孔径分布进行精确量化。图 5 反映了溶胀温度对微米级开纤羊毛非织造材料孔径分布的影响,可以看出:当溶胀温度不超过 50 °C 时,羊毛非织造材料的孔径整体随着温度的升高呈减小趋势,25 °C 时孔径范围在 20~175 μm,最可几孔径为 40~60 μm,50 °C 时孔径范围在 5~162 μm,最可几孔径为 20~40 μm;当溶胀温度达到 75 °C 后,羊毛非织造材料的孔径整体随着温度的升高呈增大趋势,最大孔径甚至达到了 692 μm,原因可能是温度过高导致纤维过度溶胀,随后在机械辅助作用下,纤维结构单元被过度剥离甚至从主体脱落,并在后续清洗过程中被洗去,羊毛纤维直径减小,非织造材料孔径因此增大。

图 6 是不同溶胀温度制得微米级开纤羊毛非织造材料的红外光谱图。从图 6 可以看出,100 °C 溶胀温度处理的羊毛非织造材料,其官能团特征峰强度最强,这与前期的孔径结果不一致,原因可能是该温度下大量脱落的结构体暂时黏附在样品上,导致红外探头与脱落的结构体接触,造成了误差。对比其他 3 个溶胀温度处理的羊毛非织造材料的红外光谱图可以发现,50 °C 溶胀温度处理的羊毛非织造材料其官能团特征峰强度最高,说明该温度下微米级开纤的羊毛非织造材料的官能团暴露量最高。

图 7 进一步统计了不同溶胀温度条件下羊毛非织造材料的损耗率,可以看出:损耗率随溶胀温度的

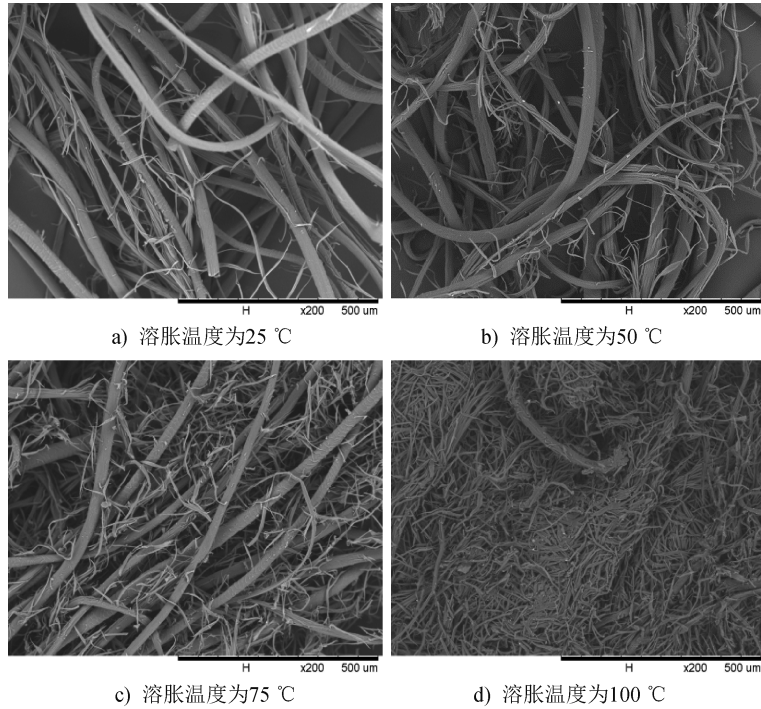


图 4 不同溶胀温度处理后微米级开纤羊毛非织造材料扫描电镜照片

Fig. 4 SEM photos of micron-level fiber splitting wool nonwovens treated at different swelling temperatures

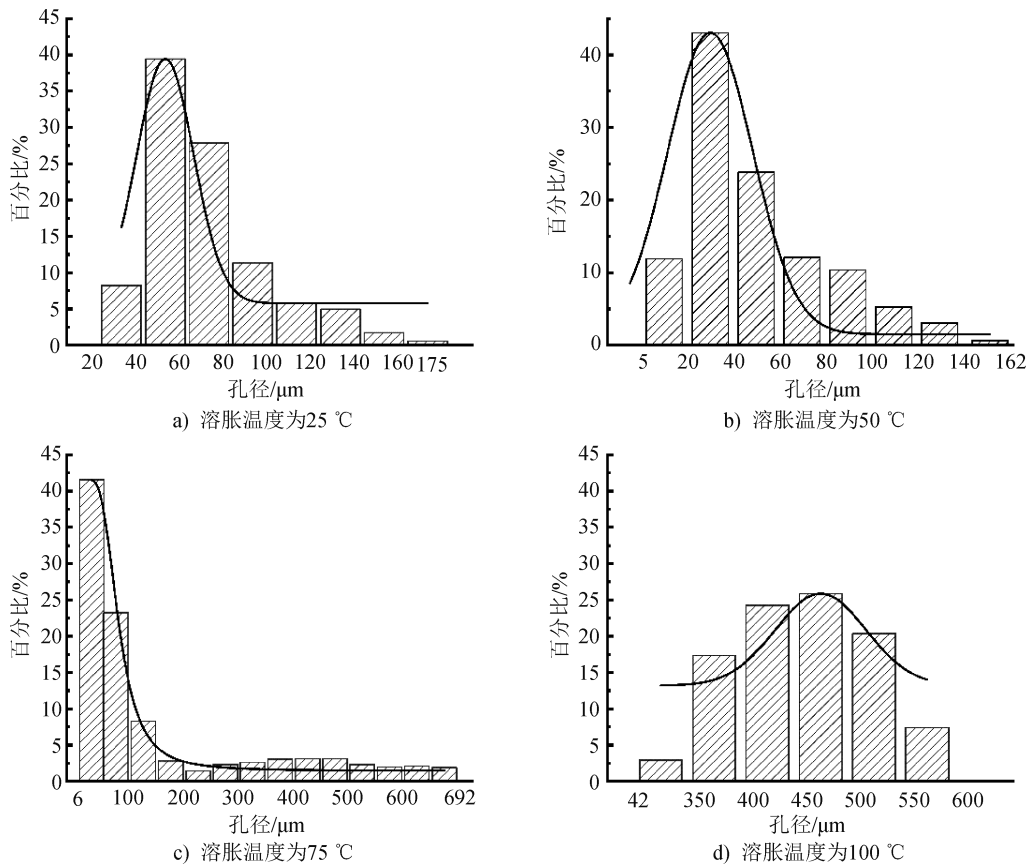


图 5 溶胀温度对微米级开纤羊毛非织造材料孔径分布的影响

Fig. 5 Effect of swelling temperature on pore size distribution of micron-level fiber splitting wool nonwovens

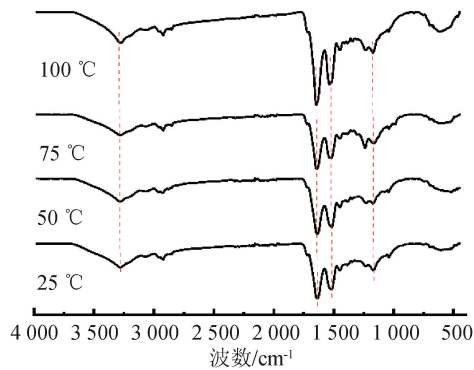


图 6 不同溶胀温度制得微米级开纤羊毛非织造材料的红外光谱图

Fig. 6 Infrared spectra of micron-level fiber splitting wool nonwovens at different swelling temperatures

提升而增加,其中 100 °C 溶胀温度处理的羊毛非织造材的损耗率已达 80%,显然此时的非织造材料已无法实现自支撑。因此,综合前述测试结果,确定 50 °C 为最佳的微米级开纤温度。

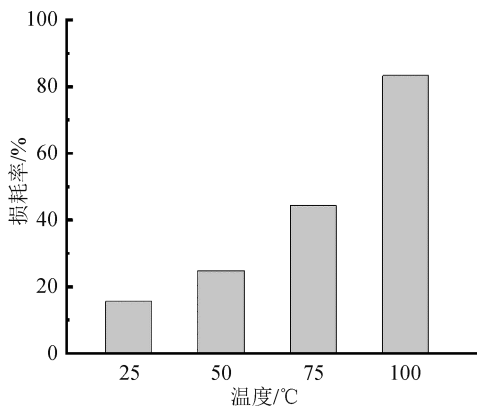


图 7 不同溶胀温度条件下羊毛非织造材料的损耗率

Fig. 7 Loss percentage of wool nonwovens under different swelling temperatures

与微米级开纤处理一样,亚微米级开纤过程中温度的影响也十分显著。该过程中温度越高,分子运动速度越快,还原剂对羊毛非织造材料中二硫键的分离强度越大^[16]。固定 pH 值为 10、还原时间为 2.5 h,图 8 统计了不同还原温度条件下羊毛非织造材料的损耗率,可以看出:高温(100 °C)下羊毛非织造材料损耗最严重,损耗率高达 80%,此时 L-半胱氨酸已经将羊毛结构体内部的二硫键分解,羊毛非织造材料被溶解为角蛋白溶液,可见 100 °C 并不是实现亚微米级开纤的适宜温度;而 50 °C 和 75 °C 处理的羊毛非织造材料的损耗区别不明显,损耗率均接近 10%。

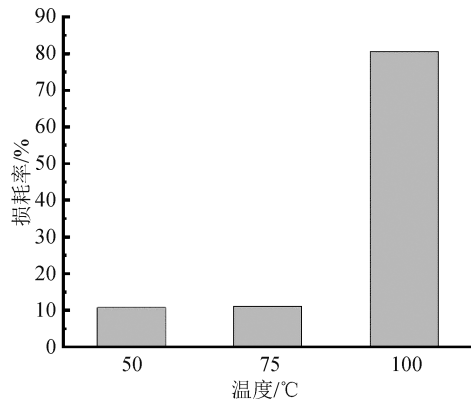


图 8 不同还原温度条件下羊毛非织造材料的损耗率

Fig. 8 Loss percentage of wool nonwovens at different reduction temperatures

固定 pH 值为 10、还原时间为 2.5 h,图 9 为不同还原温度处理的亚微米级开纤羊毛非织造材料的红外光谱图。从图 9 可以看出,50 °C 和 75 °C 还原温度处理的羊毛非织造材料的官能团暴露量相似,且均高于 100 °C 还原温度处理的羊毛非织造材料。为此,图 10 进一步比较了 pH 值为 10、还原时间为 2.5 h 的条件下,50 °C 和 75 °C 还原温度处理的羊毛非织造材料的孔径分布状况,可以看出:50 °C 处理的羊毛非织造材料的最可几孔径为 20~40 μm,75 °C 还原温度处理的羊毛非织造材料的最可几孔径为 1.4~20 μm,显然后者的最可几孔径更小。综合上述测试得出,75 °C 还原温度处理的羊毛非织造材料孔径最小,官能团暴露量最多,损耗较低。由此确定 75 °C 为最佳亚微米级开纤温度。

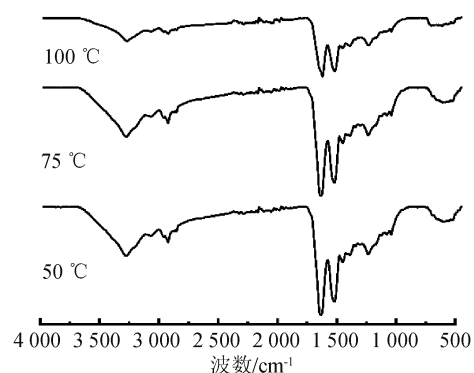


图 9 不同还原温度处理的亚微米级开纤羊毛非织造材料的红外光谱图

Fig. 9 Infrared spectra of submicron-level splitting wool nonwovens at different reduction temperatures

2.3 还原时间

根据文献[13]的报道,高浓度甲酸能够在几秒

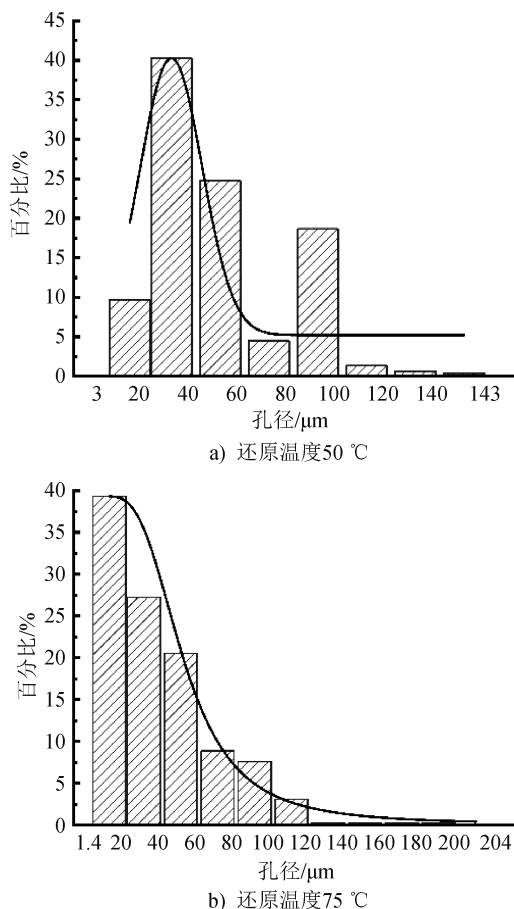


图 10 还原温度对亚微米级开纤羊毛非织造材料孔径分布的影响

Fig. 10 Effect of reduction temperature on pore size distribution of submicron-level splitting wool nonwovens

内迅速靶向溶胀单根羊毛纤维中的结构体间质,而还原剂会无差别地解开纤维中的二硫键,其中间质由于结晶度低会被优先解键去交联,且随着还原时间的增加,结构单元内部紧密的交联也会被破坏,因此探究适宜的还原时间对亚微米级结构体的剥离十分重要。本小节固定 pH 值为 10、还原温度为 75 °C,探究适宜的还原时间。

图 11 展示了不同还原时间处理的羊毛非织造材料的损耗率,可以看出:羊毛非织造材料的损耗率随还原时间的增加而线性增长,且还原时间在 12.5 h 的羊毛非织造材料已无法维持自身结构的稳定。图 12 展示了不同还原时间处理的羊毛非织造材料的红外光谱图,以表征官能团的暴露程度。从图 12 可以看出,还原时间在 2.5 h 的羊毛非织造材料,其各基团吸收峰最强烈。再结合损耗率测试

结果认为,还原时间在 2.5 h 的羊毛非织造材料的整体性能优于其他还原时间的羊毛非织造材料。此外,图 13 还比较了还原时间为 1.0、2.5 和 7.5 h 的羊毛非织造材料的孔径分布,发现还原时间在 2.5 h 的羊毛非织造材料的最可几孔径更小,说明此时的亚微米级结构体剥离程度最高。综合上述测试得出,2.5 h 为最佳亚微米级开纤的还原时间。

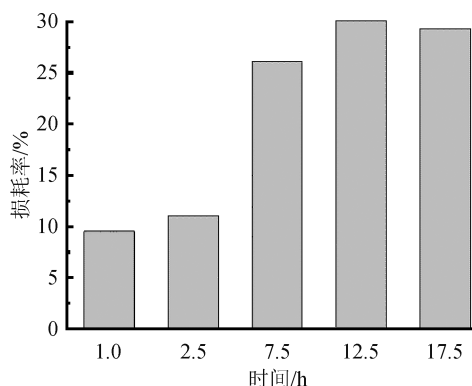


图 11 不同还原时间条件下羊毛非织造材料的损耗率
Fig. 11 Loss percentage of wool nonwovens under different reduction time

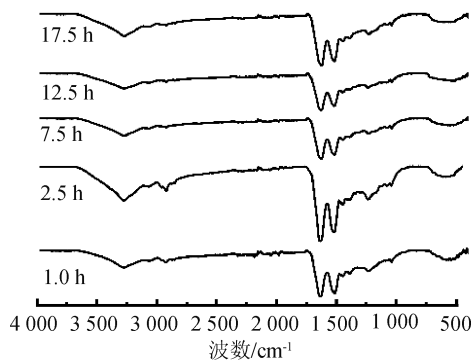
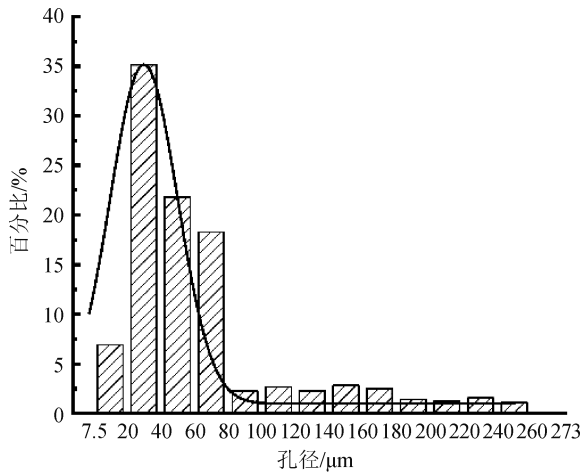


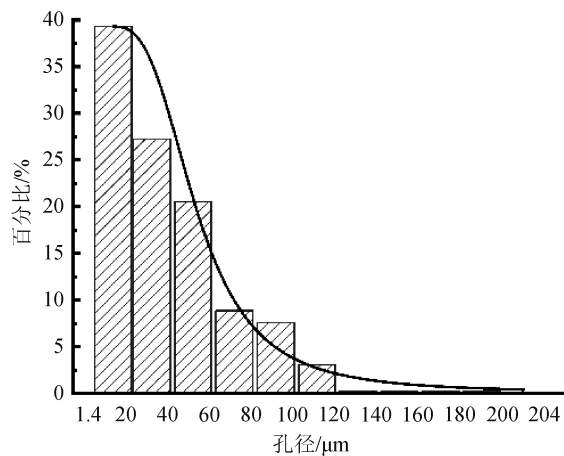
图 12 不同还原时间处理的亚微米级开纤羊毛非织造材料的红外光谱图
Fig. 12 Infrared spectra of submicron-level splitting wool nonwovens under different reduction time

2.4 pH 值

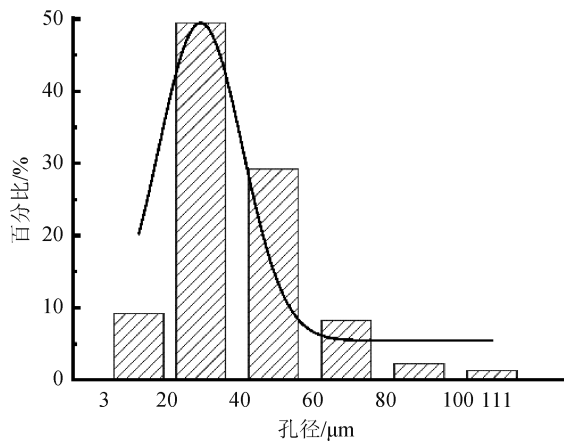
羊毛纤维在碱性环境中易水解,这有助于剥离亚微米级结构单元。因此,探究亚微米级开纤过程中还原体系的 pH 值很有必要。本小节固定还原时间为 2.5 h、还原温度为 75 °C,探索适宜的还原体系 pH 值。图 14 反映了亚微米级开纤过程中,还原体系 pH 值对非织造材料损耗率的影响,可以看出:在强碱性环境(pH 值=12)中,羊毛非织造材料的损耗率接近 100%,而其他还原体系 pH 值条件下得到的



a) 还原时间1.0 h



b) 还原时间2.5 h



c) 还原时间7.5 h

图 13 还原时间对亚微米级开纤羊毛非织造材料孔径分布的影响

Fig. 13 Effect of reduction time on pore size distribution of submicron-level splitting wool nonwovens

羊毛非织造材料的损耗率相差不大,说明强碱性环境对羊毛的水解作用过强,会导致其无法维持自身结构的稳定。

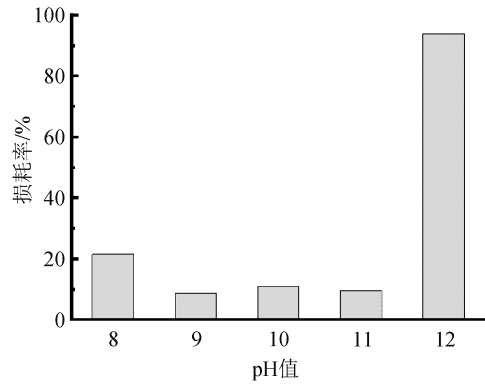


图 14 不同还原体系 pH 值条件下亚微米级开纤羊毛非织造材料的损耗率

Fig. 14 Loss percentage of submicron-level splitting wool nonwovens under different pH values of reduction system

图 15 为不同还原体系 pH 值亚微米级开纤处理得到的羊毛非织造材料的红外光谱图,可以看出: pH 值为 10 和 12 时红外光谱图均展现了较高的基团吸收峰强度,说明在这 2 种 pH 值条件下开纤处理得到的羊毛非织造材料均暴露了较多的官能团。其中, pH 值为 12 时出现的高吸收峰强度归因于强碱性还原溶液溶解了羊毛非织造材料,并在过滤烘干后残留了部分角蛋白粉末。而正是这些粉末的高比表面积赋予了羊毛非织造材料较多的官能团暴露量。

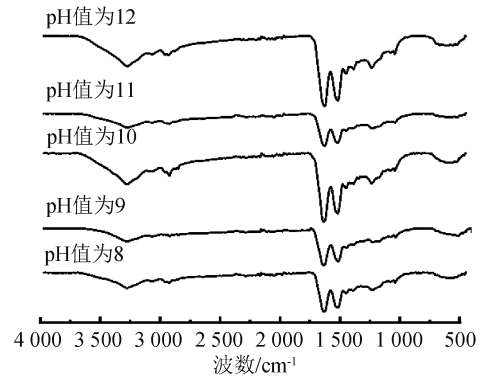


图 15 不同 pH 值处理的亚微米级开纤羊毛非织造材料的红外光谱图

Fig. 15 Infrared spectra of submicron-level splitting wool nonwovens under different pH values

图 16 为不同还原体系 pH 值亚微米级开纤处理得到的羊毛非织造材料的孔径分布状况,可以看出:还原体系 pH 值为 8 时,溶液呈弱碱性,对羊毛纤维的水解作用不明显,处理得到的羊毛非织造材料的最可几孔径为 20~40 μm;当 pH 值达到 10 时,

水解作用显著增强,羊毛非织造材料的最可几孔径为 1.4~20 μm ;当 pH 值为 11 时,溶液呈强碱性,其对羊毛的水解作用加剧,甚至会破坏纤维的结晶区,导致羊毛非织造材料的孔径不减反增,最可几孔径

增大至 20~40 μm 。故综合分析得出,还原体系 pH 值为 10 是最佳的碱性环境,此时亚微米级开纤处理得到的羊毛非织造材料的孔径最小、官能团暴露量最多、损耗率较低。

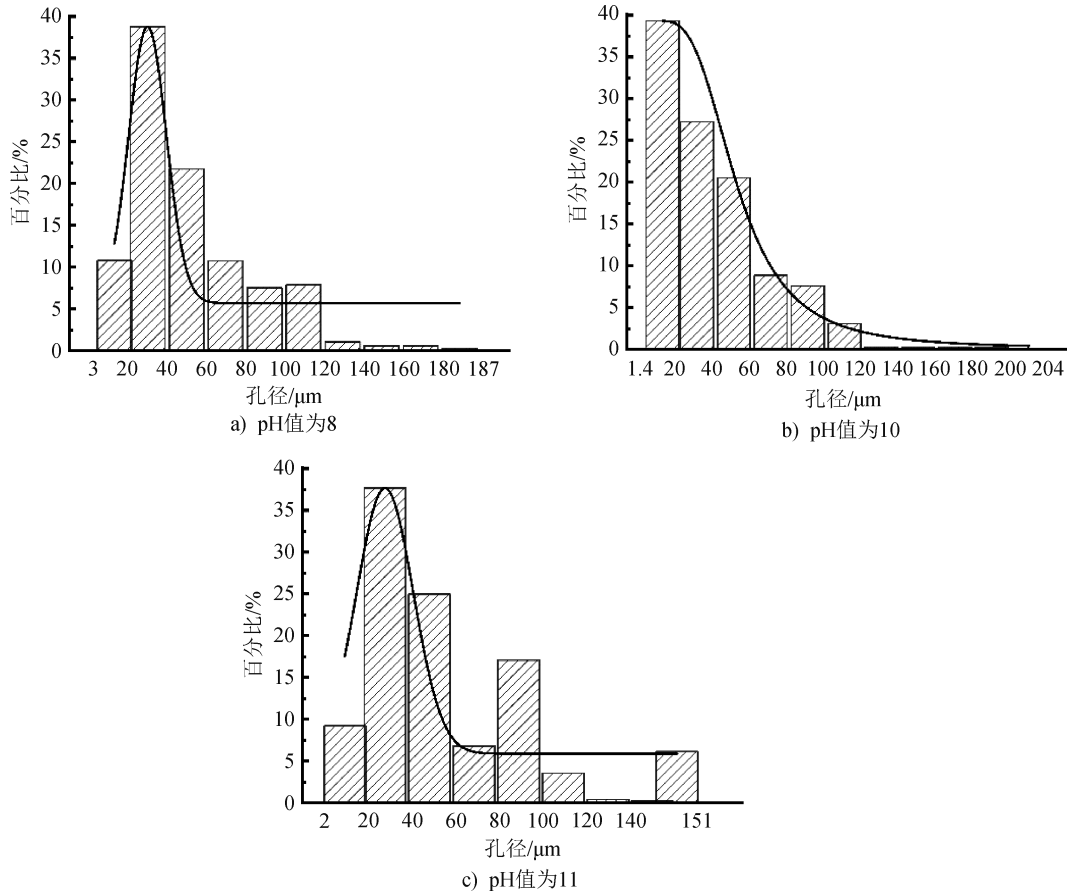


图 16 pH 值对亚微米级开纤羊毛非织造材料孔径分布的影响
Fig. 16 Effect of pH value on pore size distribution of submicron-level splitting wool nonwovens

两级开纤处理前后羊毛非织造材料的扫描电镜照片对比如图 17 所示,可以明显观察到,经微米级开纤处理后,羊毛纤维中的微米级结构单元(正、副皮质细胞)部分剥离纤维主体;经亚微米级开纤处

理后,更小尺寸的巨原纤部分剥离正皮质细胞,最终形成类似树枝的分支结构,表明羊毛非织造材料成功实现两级开纤。

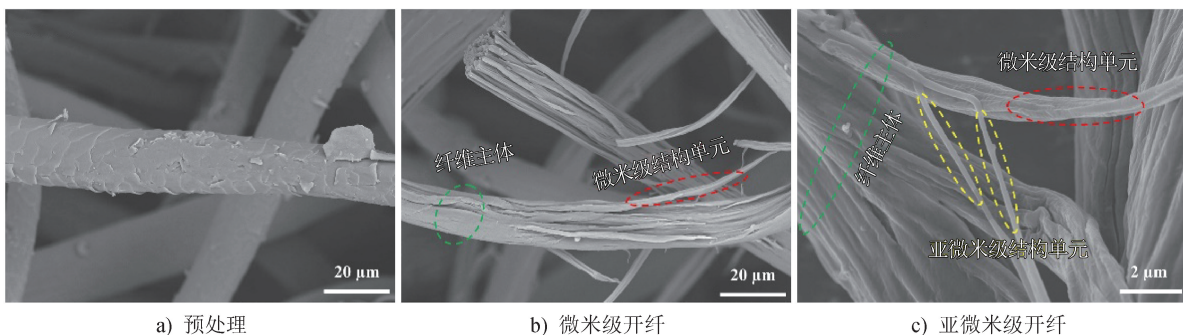


图 17 两级开纤处理前后羊毛非织造材料的扫描电镜照片
Fig. 17 SEM photos of wool nonwovens before and after two-stage fiber splitting treatment

3 结论

为实现废弃羊毛的回收和高效再利用,本研究通过水刺工艺将废弃羊毛制成羊毛非织造材料,并在预处理后通过简单的两级开纤处理,使羊毛中的微米级和亚微米级结构单元部分剥离主体,形成类似树枝的分支结构。探究了处理条件对羊毛非织造材料的影响,得出最佳开纤工艺,并最终获得了高孔隙率、高官能团暴露量和稳定结构的废弃羊毛基功能非织造材料。所得材料可为废弃羊毛集合体在水处理、空气治理、生物医用、纺织服装等领域的高效应用提供新思路。在探究处理条件的过程中,得出以下结论:

(1) 固液比提高,则羊毛非织造材料与甲酸的接触减少,损耗减少,但结构单元不易被剥离,故确定 1.5:50 为最佳固液比。

(2) 温度升高,甲酸和还原体系会加速溶胀羊毛非织造材料,损耗率随之提高,同时结构体剥离量增大。其中,50℃最适宜剥离大量微米级结构单元,75℃最适宜剥离大量亚微米级结构单元。

(3) 羊毛非织造材料的损耗率随还原体系溶胀时间的增加而显著提高。经试验确定,2.5 h 为最佳亚微米级开纤时间。

(4) 碱性环境可促进羊毛非织造材料的溶胀,随着还原体系 pH 值的增加,羊毛非织造材料的官能团暴露量增加,孔径减小,但强碱性环境下羊毛非织造材料的损耗率也非常高。经试验最终确定,pH 值为 10 是最佳碱性环境。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

[1] 萨如拉,曹蝶,张志洁,等. 熔融尿素法提取废弃羊

毛角蛋白的机制[J]. 毛纺科技, 2023, 51(9): 51-57.

[2] 李海洋,尉霞,陈成煜,等. 羊毛/芳纶包芯纱针织物开发及其性能[J]. 产业用纺织品, 2023, 41(6): 25-29.

[3] TOFAN L. Insights into the applications of natural fibers to metal separation from aqueous solutions [J]. Polymers, 2023, 15(9): 2178.

[4] WANG L J, SHANG Y S, ZHANG J, et al. Recent advances in keratin for biomedical applications [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2023, 321: 103012.

[5] ALVES D I, BARREIROS M, FANGUEIRO R, et al. Valorization of textile waste: non-woven structures and composites [J]. Frontiers in Environmental Science, 2024, 12: 1365162.

[6] 李丽君,罗佳妮,唐雨蓉,等. 废弃混杂湖羊毛/低熔点纤维针刺非织造布的制备及性能研究[J]. 产业用纺织品, 2020, 38(10): 19-26.

[7] 刘津玮,张宪胜. 阻燃纤维及纤维间阻燃协同效应研究进展[J]. 产业用纺织品, 2019, 37(2): 1-7.

[8] 杨晓琴,顾欣,邓桦. 接枝阻燃改性羊毛织物的性能测试[J]. 产业用纺织品, 2015, 33(4): 39-43.

[9] 谭羽涵,邓通,黄鑫鑫. 废弃羊毛纺织品的物理回收再利用技术现状[J]. 毛纺科技, 2023, 51(7): 119-125.

[10] 刘燕,陶园,王其才,等. 废弃纤维资源化吸声材料的研究进展[J]. 产业用纺织品, 2021, 39(9): 1-5.

[11] 张洪康,王春红,冯震,等. 废弃羊毛纤维隔热非织造材料的制备[J]. 毛纺科技, 2023, 51(4): 1-6.

[12] 冯龙,董裕,胡雪敏,等. 废弃羊毛纤维的改性及吸附性能研究[J]. 针织工业, 2021(5): 42-45.

[13] 范杰. 羊毛角蛋白晶须分离及其应用研究[D]. 上海: 东华大学, 2010.

[14] 王魁,马吉宏,菅应凯,等. 羊毛角蛋白的 L-半胱氨酸提取[J]. 印染, 2015, 41(20): 33-36.

[15] 胡永. 角蛋白非织造过滤材料的制备及性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2022.

[16] 梁潇. 羊毛角蛋白的提取及其防毡缩的应用研究[D]. 上海: 东华大学, 2015.

把论文写在祖国的大地上!