

废旧聚酯/棉混纺织物的在线近红外定量分析与自动分选

郑佳辉¹, 杜宇君¹, 李文霞^{1*}, 刘正东², 王华平³

(1. 北京服装学院 材料设计与工程学院, 北京 100029; 2. 北京服装学院 服装艺术与工程学院, 北京 100029;
3. 东华大学 材料科学与工程学院, 上海 201620)

摘要: 在前期探究的最佳测试条件下, 利用自主研发的“纤维制品主体组分高效识别与分选装置”对废旧聚酯/棉混纺织物样品进行在线原始近红外光谱采集。基于在线原始谱图, 探讨出最佳光谱预处理方法为S-G平滑+最大最小归一化(MMN)+S-G导数, 并利用偏最小二乘法建立了废旧聚酯/棉混纺织物的在线近红外定量分析模型, 模型的交互验证均方根误差(RMSECV)为1.47, 校正相关系数(R_C)、验证相关系数(R_V)值均不小于0.99, 校正相对预测偏差(RPDC)为18.17, 验证相对预测偏差(RPDV)为13.13, 交互验证相对预测偏差(RPDCV)为11.76。为验证模型的可靠性, 选取30个外部样本进行在线验证, 验证结果的线性方程为 $y = (1.00 \pm 0.01)x - (0.88 \pm 0.56)$, 预测准确率为93.3%。将模型导入分选装置的“纺织品在线主控程序”后, 对设备设定不同聚酯含量织物的分选类别, 即可对废旧聚酯/棉混纺织物样本进行含量预测, 并通过装置的吹分分选系统将样品自动吹扫到相应的收集框中。每个样品预测并分选的时间小于2 s, 机械自动分选结果无误。利用所建模型和分选装置可对废旧聚酯/棉混纺织物进行在线高效测定与自动分选。

关键词: 废旧纺织品; 在线近红外; 定量分析模型; 高效识别; 自动分选

中图分类号: O657.33 文献标识码: A 文章编号: 1004-4957(2020)11-1365-06

Online Near-infrared Quantitative Analysis and Automatic Sorting of Waste Polyester/Cotton Blend Fabrics

ZHENG Jia-hui¹, DU Yu-jun¹, LI Wen-xia^{1*}, LIU Zheng-dong², WANG Hua-ping³

(1. College of Material Design and Engineering, Beijing Institute of Fashion and Technology, Beijing 100029, China;
2. College of Clothing Art and Engineering, Beijing Institute of Fashion and Technology, Beijing 100029, China;
3. College of Materials Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Under the optimal test conditions explored in the early stage, the online original near-infrared spectrum for the polyester/cotton blend fabrics samples was collected using a self-developed “high-efficiency identification and sorting device for the main components of fiber products”. Based on the original online spectrogram, an optimal spectral pretreatment method was proposed as S-G smoothing + MMN + S-G derivative. Meanwhile, an online near-infrared quantitative analysis model for polyester/cotton blend fabrics was established by partial least square method. The root mean standard error of cross validation(RMSECV) was 1.47, the correlation coefficient of calibration(R_C) and correlation coefficient of validation(R_V) were not less than 0.99, the relative predictive deviation of calibration(RPDC) was 18.17, the relative predictive deviation of validation(RPDV) was 13.13, and the relative predictive deviation of cross validation(RPDCV) was 11.76. To verify the reliability of the model, 30 external samples were selected for online verification. The linear equation for the verified results was $y = (1.00 \pm 0.01)x - (0.88 \pm 0.56)$, with an accurate rate of 93.3%. After importing the model into the “textile online master control program” of the sorting device, the sorting category of the equipment was set for different polyester content fabrics, then the content prediction for the polyester/cotton fabrics samples were performed, and the samples were automatically purged into the corresponding collection frame through the device’s blowing and sorting system. The time for

each sample to be predicted and sorted was less than 2 s, and the automatic mechanical sorting result was correct. Therefore, the established model and sorting device could be used for efficient online measurement and automatic sorting of waste polyester/cotton blended textiles.

Key words: waste textiles; online near-infrared; quantitative analysis model; efficient identification; automatic sorting

我国作为人口大国同时也是纺织品大国,随着经济的快速发展和人们日常消费水平的提高,我国平均每年消耗由各种纤维原料制成的纺织品约 6 000 万吨^[1]。我国国家发改委 2014 年公布的《中国资源综合利用年度报告》显示,2013 年我国废旧纺织品产生量约有 2 000 万吨之多,其中化纤为 1 377.7 万吨,约占废旧纺织品总存量的 68%,棉纤维为 562 万吨,约占废旧纺织品总存量的 28%^[2]。废旧纺织品综合利用量约为 300 万吨,回收利用率仅 15% 左右^[3]。由此可见,废旧聚酯/棉混纺织物的回收利用是十分必要的。但由于废旧聚酯/棉混纺织物的组分含量差异较大,给回收再利用过程中原料的筛选带来极大困难。因此,废旧聚酯/棉混纺织物的回收再利用首要解决的问题是对其组分进行在线高效预测与自动分选。目前,国外如荷兰 Frankenhuis 公司已开发出纺织品在线全自动分选系统,可区分棉、聚酯、羊毛和聚酰胺 4 类^[4] 织物;比利时 Valan 公司开发出旧衣物回收分拣设备(分拣速度高达 1 800 件/h),可实现对废旧纺织品常规成分的识别^[5]。而我国在此技术领域仍处于探索阶段,分拣仍主要靠人工完成,速度慢、识别率低,无法满足工业化规模的生产要求。因此,在回收现场进行在线高效识别与自动分选是实现废旧纺织品回收再利用的重要前提和保障。

近红外(Near-infrared, NIR)光谱技术是将光谱测量技术、化学计量学和计算机技术融为一体的综合技术,是实现现场实时、快速无损测定的最佳选择,其在线技术已成功应用于医药^[6-7]、石化^[8-9]、食品^[10-11]和农业^[12]等领域,而在纺织品检测方面仍处于离线实验室阶段^[13-14]。本文拟用自主研发的国内首台“纤维制品主体组分高效识别与分选装置”,基于 NIR 光谱技术,利用偏最小二乘法(Partial least square, PLS)建立废旧聚酯/棉混纺织物的在线 NIR 定量分析模型,将模型应用于分选装置,以实现废旧聚酯/棉混纺织物的在线高效预测与自动分选。

1 实验部分

1.1 设备与材料

自主研发的“BIFT NIRMagic 6701 型纤维制品主体组分高效识别与分选装置”(简称: BIFT 分选装置),内置阵列式 NIR 光谱仪,光谱范围 900~2 500 nm。该装置主要包括 4 部分:纺织品进料输送系统、NIR 检测系统、纺织品识别与分选软件系统、吹分分选控制系统,分选速度优于 30 件/min。

软件系统:纺织品在线主控程序(Textile online master control program, TOCP);化学计量学软件(ChemoStudio2019, CS2019)(委托北京伟创英图公司开发)。

Nicolet iS10 傅里叶变换中红外(Fourier transform middle infrared spectra, FT-MIR)光谱仪(美国 Thermo Fisher Scientific 公司),带衰减全反射(ATR)附件,测试条件:波数范围为 4 000~400 cm^{-1} ,分辨率为 8 cm^{-1} ,扫描次数为 32 次。

样品:由浙江绿宇环保股份有限公司、北京城市矿产资源开发有限公司、浙江富源再生资源有限公司等提供及市售,共 114 块不同组织结构、不同颜色的聚酯/棉混纺织物样品,并采用傅里叶变换中红外(FT-MIR)光谱法和国家标准化学溶解法进行组分鉴别及含量测定^[15-16]。

1.2 织物样品在线原始 NIR 光谱的测试

利用 BIFT 在线识别与分选装置,以白色陶瓷板为参比,并用陶瓷板和聚苯乙烯薄膜共同对装置的核心部件 NIR 光谱仪进行校准。样品测试采用课题组前期探究的最佳采样条件:传输速度为 0.41 m/s,扫描积分时间为 1 ms,扫描次数为 10 次,光谱测试方式为漫反射,布样测试厚度折叠至大于 2.5 mm,层与层之间不能有大缝隙^[17]。

启动“分选装置”,运行纺织品在线主控程序 TOCP,首先进行装置自检,然后根据最佳采样条件设置参数并测量参比,此时设备指示灯为红色。参比测试完成后,指示灯变为绿色,此时开始织物样品在线原始 NIR 光谱的测试。

1.3 废旧聚酯/棉混纺织物在线 NIR 定量分析模型的建立

废旧聚酯/棉混纺织物在线 NIR 定量分析模型的建立主要分为以下 5 个步骤:

(1) 在 CS2019 软件中添加废旧聚酯/棉混纺织物样品的在线原始 NIR 谱图, 并以聚酯含量($T\%$)为模型性质。建立模型所用样品的 $T\%$ 应在 $0\sim 100\%$ 范围内均匀分布, 以使模型具有更好的普适性。

(2) 使用 Kennard - Stone(K - S) 自动分类方法(校正集占 70%) 选择模型样本。该方法基于变量之间的欧几里得距离, 且样本可均匀地分为校正集和验证集, 是目前最常用的分类方法。

(3) 根据相关系数图设置相关阈值以选择建模谱带, 该谱带应包含聚酯/棉织物的主要特征峰。

(4) 使用偏最小二乘方法建模, 并分别使用 S - G 导数、S - G 平滑、多元散射校正(MSC)、最大最小归一化(MMN)、均值中心化等预处理方法的不同组合建立模型。

(5) 对离群样本进行剔除并选择最佳评估因子, 以不断优化模型。校正集、验证集的模型评价参数为均方根误差、相关系数及相对预测偏差, 外部验证集的模型评价参数为聚酯/棉混纺织物样品的预测 $T\%$ 与真实 $T\%$ 之间的绝对偏差。综合比较上述参数, 以确定废旧聚酯/棉混纺织物定量分析模型的最佳建模方法。

1.4 废旧聚酯/棉混纺织物的在线定量分析与自动分选

将所建定量分析模型导入分选装置的纺织品在线主控程序 TOCP 中, 待织物样品传送至 NIR 检测区域即可得到其在线原始 NIR 谱图, 通过模型预测输出样品的组成和含量, 当样品经过分选区时根据预测结果对样品进行自动分选。本装置共配备 5 个分选箱, 其中 4 个分选箱接收待分选的 4 类织物, 第 5 个分选箱中落入其余类别织物, 即不属于待分选类别的样品均会落入此箱。

2 结果与讨论

2.1 织物样品的原始在线 NIR 光谱分析

利用 BIFT 在线分选装置共采集 114 块废旧聚酯/棉混纺织物样品的原始在线 NIR 谱图, 所有样品的组分和含量均通过 FT - MIR 光谱法和化学溶解法进行鉴别和测定。

近红外光谱吸收谱带主要是含氢基团(O—H、C—H、N—H 等)在中红外谱区基频振动峰的倍频和合频的吸收。纯聚酯、纯棉与聚酯/棉混纺织物的在线原始 NIR 图见图 1。由图可知, 纯聚酯织物在 $1\ 671\ \text{nm}$ 处为芳烃的 $=\text{CH}$ 吸收峰, $2\ 215\ \text{nm}$ 处为 $=\text{C—H}$ 弯曲振动的倍频峰和 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动的组合频; 纯棉织物在 $1\ 450\ \text{nm}$ 处为 O—H 聚合体的一级倍频峰, $2\ 100\ \text{nm}$ 处为 O—H 聚合体的伸缩振动和弯曲振动的组合频; 聚酯/棉混纺织物的主要特征峰则兼具其对应纯纤维织物的特征峰。

不同聚酯含量的废旧聚酯/棉混纺织物的 NIR 图见图 2, 由图可知, 聚酯主要特征峰($1\ 671\ \text{nm}$)的吸收强度随着其聚酯含量的增加而增强, 这为废旧聚酯/棉混纺织物的定量分析奠定了基础。

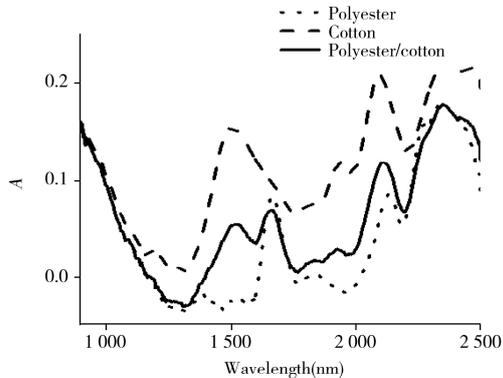


图1 纯聚酯、纯棉与聚酯/棉混纺织物的在线原始 NIR 图

Fig. 1 Online original NIR spectra of polyester, cotton and polyester/cotton blend fabrics

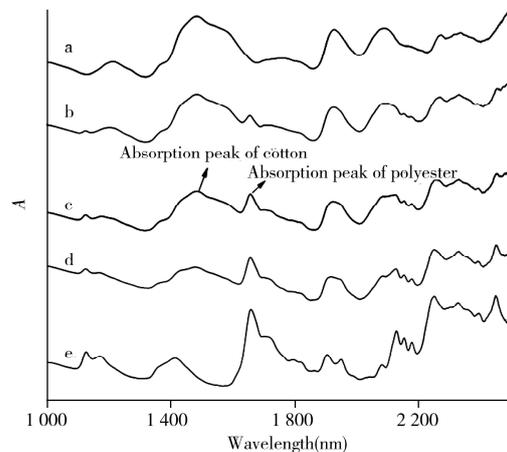


图2 不同聚酯含量的废旧聚酯/棉混纺织物的 NIR 图

Fig. 2 NIR spectra of waste polyester/cotton blend fabrics with different contents of polyester
a. 100% C(cotton), b. 30% T(polyester)/70% C, c. 53% T/47% C, d. 64% T/36% C, e. 100% T

同时在扫描废旧聚酯/棉混纺织物的在线 NIR 谱图时,发现织物的在线 NIR 谱图主要分为两种:正常谱图和特征峰不明显谱图。后者的基线整体向上漂移,该类样品共有 13 个。废旧聚酯/棉混纺织物的特征峰不明显样品谱图与其正常谱图的对比如图 3 所示。

推测造成上述情况的原因为:①样品可能经过特殊工艺(如轧光等)处理,布样表面紧密且有光泽,导致样品在近红外光谱测量时产生大量的镜面反射光^[18],而非漫反射光。镜面反射光无法到达检测器,因此样品信息缺失,其谱图特征峰不明显;②原液着色聚酯类样品中可能添加了微量炭黑,从而对其近红外光谱造成影响^[19]。因此,在后续建模过程中,对织物样品中特征峰不明显样品与正常谱图样品进行区分归类,将所有特征峰不明显样品归为“其他”类样品,不参与建模。

2.2 废旧聚酯/棉混纺织物定量模型的建立与优化

从已测定含量的废旧聚酯/棉混纺织物样品中选择代表性强的 101 个样品谱图添加到 CS2019 软件中,其中不包括 13 个无明显特征峰的废旧聚酯/棉混纺织物样品。采用 Kennard - Stone(K - S)自动分类法(校正集占 70%)选取建模样本,所得校正集样品数为 71 个,验证集样品数为 30 个。并根据相关系数图设置相关阈值为 0.7。为使定量模型具有较好的聚酯含量梯度,选取样品的聚酯含量应涵盖面广且均匀分布,具有代表性,其中校正集与验证集样品中聚酯的含量分布如图 4 所示。

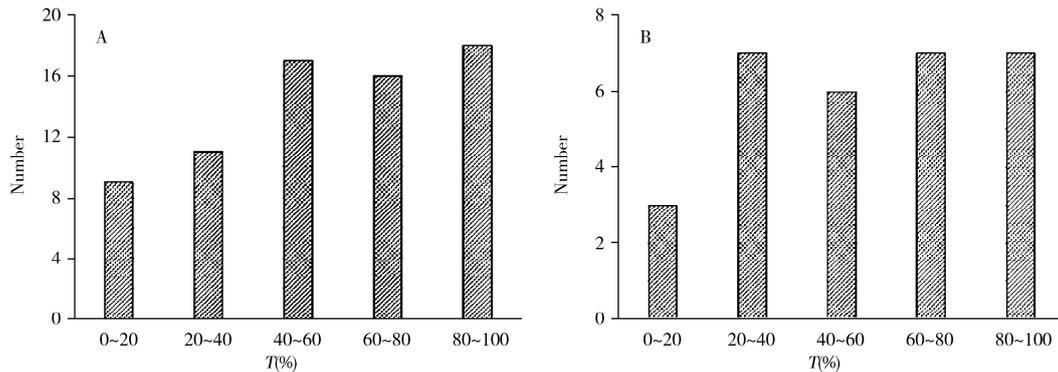


图 4 聚酯/棉混纺样品中聚酯的含量分布图

Fig. 4 Distribution diagrams of polyester content in polyester/cotton blend samples

A: calibration set; B: validation set

采用 PLS 法,并利用不同光谱预处理组合方法分别建立模型,寻找最佳光谱预处理方法。通过校正均方根误差(RMSEC)、验证均方根误差(RMSEV)、交互验证均方根误差(RMSECV)、校正相关系数(R_c)、验证相关系数(R_v)、交互验证相关系数(R_{cv})、校正相对预测偏差(RPDC)、验证相对预测偏差(RPDV)和交互验证相对预测偏差(RPDCV)对模型进行内部验证,最后通过外部验证考察模型的准确性和适应性,评估参数如表 1 所示。

表 1 不同方法对废旧聚酯/棉混纺织物定量模型的预测精度

Table 1 Prediction accuracy of waste polyester/cotton blend sample quantitative model by different methods

Preprocessing	Factor	Calibration set			Cross validation set			Validation set		
		RMSEC	R_c	RPDC	RMSECV	R_{cv}	RPDCV	RMSEV	R_v	RPDV
Raw(未经预处理)	3	1.60	0.99	8.51	1.68	0.99	7.71	1.53	0.99	6.96
S - G derivative	7	1.35	1.00	13.57	1.87	0.99	7.11	1.33	1.00	10.65

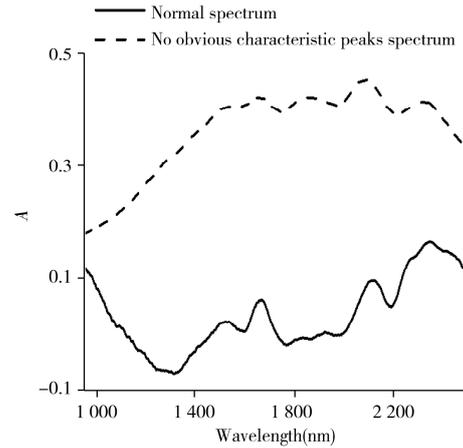


图 3 废旧聚酯/棉混纺织物的特征峰不明显谱图与正常谱图对比

Fig. 3 Comparison of the no obvious characteristic peak spectrum of waste polyester/cotton blend fabrics with its normal spectrum

(续表 1)

Preprocessing	Factor	Calibration set			Cross validation set			Validation set		
		RMSEC	R_C	RPDC	RMSECV	R_{CV}	RPDCV	RMSEV	R_V	RPDV
S - G smoothing + S - G derivative	7	1.36	1.00	13.05	1.93	0.99	6.50	1.41	1.00	9.54
S - G smoothing + MSC + S - G derivative	6	1.25	1.00	15.40	1.49	1.00	11.93	1.22	1.00	12.65
S - G smoothing + MMN + S - G derivative	6	1.18	1.00	18.17	1.47	1.00	11.76	1.20	1.00	13.13
S - G smoothing + MMN + MSC + S - G derivative	7	1.35	1.00	13.34	1.64	0.99	9.04	1.19	1.00	13.33
S - G smoothing + MMN + S - G derivative + Mean centralization(均值中心化)	9	1.16	1.00	18.60	1.52	1.00	10.84	1.24	1.00	12.34

以 RMSEC、RMSEV、RMSECV、 R_C 、 R_V 与 RPDC 等为评价指标对模型的最优预处理方法进行选择，其中 RMSECV 值越小， R_C 、 R_V 、 R_{CV} 越接近 1，且 RPDC、RPDV 与 RPDCV 值越高则表明模型的准确性越高，预测性能越好。由表 1 可知，6 种预处理方法的 R_C 、 R_{CV} 、 R_V 值均不小于 0.99，RPDC、RPDCV 与 RPDV 均不小于 6.50；但 RMSECV 最低值为 1.47，数值较高，这可能是由于纺织品来源不一致，相同组分不同厂家生产的纺织品存在一定差异，且实验所用样品的数量较少，含量梯度分布不均匀所致。综合考虑选择 S - G 平滑 + MMN + S - G 导数为废旧聚酯/棉混纺织物定量分析模型的最佳预处理方法，所建模型的 RPDC 为 18.17，RPDV 为 13.13，RPDCV 为 11.76。

同时，利用 30 个废旧聚酯/棉混纺织物外部验证样品评价模型的准确性，若聚酯含量(T%)的真实值和预测值之间的绝对误差小于 3%，则认为模型外部验证的预测结果准确。所建模型外部验证的预测结果如图 5 所示，拟合方程为 $y = (1.00 \pm 0.01)x - (0.88 \pm 0.56)$ ，预测准确率为 93.3%。据分析，预测错误的样品是由于聚酯/棉混纺织物中 1 种组分的含量高于 97% 所致，同时所建模型不能预测无明显特征峰的样品、涂层类、含胶类样品。

2.3 废旧聚酯/棉混纺织物的在线识别与自动分选结果分析

将建好的定量分析模型导入主控程序 TOCP，并设定不同聚酯含量的废旧聚酯/棉混纺织物的分选通道，对样品进行含量预测时，每个样品的预测结果均在系统界面的结果栏中显示。样品将根据预测结果被自动吹分至对应的分选箱内，不能被模型识别的样品则落入“其他类”分选箱中。需要说明的是，由于实验室空间有限，只能放置 5 个分选箱，可分选出设定的 4 类样品和 1 类其它样品。因此在实验中将废旧聚酯/棉混纺样品

按照聚酯含量(T%)划分为 0~25%、25%~50%、50%~75%、75%~100% 四类，对应 4 个分选箱。样品组分含量预测及自动分选需经人工放样、NIR 检测、模型预测含量和自动分选吹入分选箱 4 个步骤，由于人工放样速度的影响，整个过程在 2 s 内完成。30 个废旧聚酯/棉混纺外部验证样品的在线识别与自动分选结果如表 2 所示，模型在线识别结果中，识别正确样品 28 个，准确率为 93.3%，由于聚酯含量(T%)的真实值和预测值之间的绝对误差小于 3%，机械自动分选结果无误。因此，将所建模型

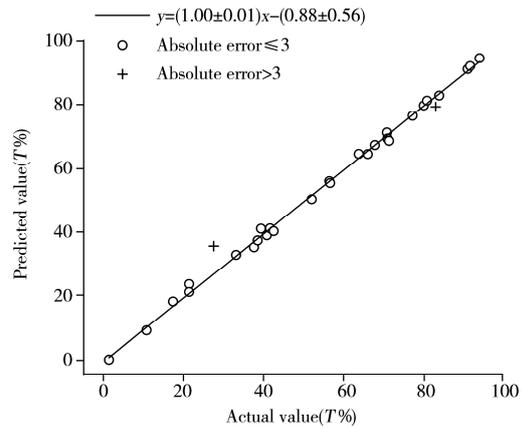


图 5 定量模型中外部验证样品聚酯含量的真实值和预测值
Fig. 5 The real value and predicted value of polyester content of the external validation sample in the quantitative model

表 2 在线识别与自动分选结果分析
Table 2 Analysis of online recognition and automatic sorting results

Polyester content in polyester/cotton blended fabric	Quantity	Correct quantity of online recognition	Correct quantity of automatic sorting
0 ~ 25%	5	5	5
25% ~ 50%	8	7	8
50% ~ 75%	9	9	9
75% ~ 100%	8	7	8
Total	30	28	30

用于自主研发的在线分选设备, 可以实现对废旧聚酯/棉混纺织物的高效识别与自动分选。

3 结 论

本文基于 NIR 光谱技术, 利用自主研发的“纤维织物在线 NIR 高效识别与自动分选装置”, 在最佳预处理方法 S-G 平滑 + MMN + S-G 导数条件下, 利用 PLS 法建立了废旧聚酯/棉混纺织物的在线 NIR 定量分析模型(不包括无明显特征峰样品), 模型的 RMSECV 值为 1.47; R_C 、 R_V 、 R_{CV} 值均不小于 0.99; RPDC 为 18.17, RPDV 为 13.13, RPDCV 为 11.76, 表明模型的稳健性较好。利用该模型对 30 个外部样品进行在线验证, 准确率达 93.3%, 预测、分选时间小于 2 s, 机械自动分选过程无误。将所建模型应用于 BIFT 在线分选设备, 可实现对废旧聚酯/棉混纺织物的高效识别与自动分选, 为废旧纺织品的高效、高值化回收利用提供了新的技术。

参考文献:

- [1] Dong S Y, Chen S Q. *Liaoning Silk*(董淑依, 陈世前. 辽宁丝绸), **2020**, 2: 57-59.
- [2] National Development and Reform Commission. *China Econ. Trade Herald*(国家发展改革委. 中国经贸导刊), **2014**, (30): 49-56.
- [3] Ding P F, Chen B J, Zhao W T, Tao L Z. *Jiangsu Silk*(丁鹏飞, 陈宝健, 赵为陶, 陶丽珍. 江苏丝绸), **2017**, 3: 26-32.
- [4] Luiken A, Bos P. *Melliand China*(Luiken A, Bos P. 国际纺织导报), **2010**, 38(11): 66-67.
- [5] Zeng T. *Research and Product Development of Regenerated Silk Wool Blended Yarn and Fabric*. Hangzhou: Zhejiang University of Technology(曾滔. 再生丝毛混纺纱线与织物工艺研究及产品开发. 杭州: 浙江理工大学), **2018**.
- [6] Šašić S, Blackwood D, Liu A, Ward W H, Clarke H. *J. Pharm. Biomed. Anal.*, **2015**, 103: 73-79.
- [7] Palmer J, O'Malley C J, Wade M J, Martin E B, Page T, Montague G A. *J. Pharm. Innov.*, **2020**, 15(2017): 26-40.
- [8] Chu X L, Chen P, Xu Y P, Li J Y, Tian S B. *Acta Pet. Sin. (Pet. Process. Sect.)*(褚小立, 陈瀑, 许育鹏, 李敬岩, 田松柏. 石油学报(石油加工)), **2017**, 33(6): 1029-1038.
- [9] Watari M, Higashiyama H, Mitsui N, Tomo M, Ozaki Y. *Appl. Spectrosc.*, **2004**, 58(2): 248-255.
- [10] Dixit Y, Casado-Gavalda P M, Cama-Moncunill R, Cama-Moncunill X, Markiewicz-Keszycza M, Cullen J P, Sullivan C. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, **2017**, 16(6): 1172-1187.
- [11] Wang J H, Zhang X W, Sun S, Sun X D, Li Q Y, Zhang Z Y. *J. Food Meas. Charact.*, **2018**, 12(3): 1473-1484.
- [12] Sexton J, Everingham Y, Donald D, Staunton S, White R. *Comput. Electron. Agric.*, **2020**, 168: 105111.
- [13] Li F, Li W X, Zhao G L, Tang S J, Li X J, Wu H M. *Spectrosc. Spectral Anal.* (李枫, 李文霞, 赵国樑, 唐世君, 李学娇, 吴红梅. 光谱学与光谱分析), **2014**, 34(10): 2785-2789.
- [14] Chai J C, Jin S Z. *J. Text.* (柴金朝, 金尚忠. 纺织学报), **2009**, 30(4): 55-58.
- [15] FZ/T 01057.8-2012. Test Methods for Identification of Textile Fibers - Part 8: Infrared Absorption Spectroscopy. Textile Industry Standards of the People's Republic of China(纺织纤维鉴别试验方法—第8部分: 红外光谱法. 中华人民共和国纺织行业标准).
- [16] GB/T 2910.11-2009. Textiles - Quantitative Chemical Analysis - Part 11: Mixture of Cellulose Fibers and Polyester Fibers(Sulfuric Acid Method). National Standards of the People's Republic of China(纺织品一定量化学分析—第11部分: 纤维素纤维与聚酯纤维的混合物(硫酸法). 中华人民共和国国家标准).
- [17] Du Y J, Li W X, Wang H P, Han X. *J. Instrum. Anal.* (杜宇君, 李文霞, 王华平, 韩熹. 分析测试学报), **2019**, 38(10): 1163-1170.
- [18] Lu W Z, Yuan H F, Chu X L. *Near-infrared Spectroscopy Instrument*. Beijing: Chemical Industry Press(陆婉珍, 袁洪福, 褚小立. 近红外光谱仪器. 北京: 化学工业出版社), **2010**.
- [19] Han C. *Study on the Preparation of Infrared Stealth Coatings and Their Camouflage Protection Application on Cotton/Polyester Blended Fabrics*. Hangzhou: Zhejiang University of Technology(韩超. 红外隐身涂料的制备及其在涤/棉织物伪装防护中的应用研究. 杭州: 浙江理工大学), **2015**.

(责任编辑: 丁 岩)