

# 基于近红外光谱的纤维含量快速检测方法研究

张英

菏泽市纺织纤维检验所

DOI:10.32629/etd.v6i5.16851

**[摘要]** 近红外光谱在纤维混纺成分识别中的应用展现出高效、无损、快速特征。本文围绕纺织品主要成分检测需求,设计纺织纤维混合比例设定方案,采集混纺状态下的近红外光谱数据,提取成分敏感波段,构建含量预测模型。试验结果显示,棉、涤纶、锦纶混纺织物的近红外响应规律明显,拟合决定系数 $R^2$ 稳定于0.998,平均检测耗时控制在2.32s以内,具备较强准确性与时效性。研究验证近红外光谱技术在纺织领域开展纤维含量快速检测具有可行性与推广价值。

**[关键词]** 近红外光谱; 纤维含量检测; 混纺织物; 光谱建模

中图分类号: S971.1 文献标识码: A

## Research on Rapid Fiber Content Detection Method Based on Near Infrared Spectroscopy

Ying Zhang

Heze Textile Fiber Inspection Institute

**[Abstract]** The application of near-infrared spectroscopy in identifying the composition of fiber blends exhibits efficient, non-destructive, and rapid characteristics. This article focuses on the demand for detecting the main components of textiles, designs a scheme for setting the mixing ratio of textile fibers, collects near-infrared spectral data in the blended state, extracts sensitive bands of components, and constructs a content prediction model. The experimental results show that the near-infrared response of cotton, polyester, and nylon blended fabrics is obvious, with a fitting determination coefficient  $R^2$  stable at 0.998 and an average detection time controlled within 2.32s, demonstrating strong accuracy and timeliness. The research verifies the feasibility and promotional value of using near-infrared spectroscopy technology for rapid detection of fiber content in the textile industry.

**[Key words]** near-infrared spectroscopy; Fiber content detection; Blended fabric; Spectral modeling

### 引言

纤维材料应用广泛,含量检测需求持续提升。传统检测方式依赖化学分析,耗时较长,试剂使用频繁,难以适应快速检测场景<sup>[1]</sup>。近红外光谱基于分子振动吸收特性,具备无损、响应快、适用面广等特点,在纺织领域逐步获得认可。光谱信号反映纤维组分差异,在特定波段内具有明显响应特征,可用于含量分析。当前应用中仍存在采集精度不高、波段选择不准、样品处理不稳等问题,影响检测效率与结果准确性<sup>[2]</sup>。为提高实际应用水平,有必要围绕采集流程、信号处理、分析方法等环节开展优化研究。本文聚焦近红外光谱在纤维含量快速检测中的应用基础,结合试验工作展开分析探讨。

### 1 试验分析

#### 1.1 近红外光谱原理

近红外光谱基于材料中含氢基团的分子振动与电磁波之间的相互作用,主要涉及C—H、O—H、N—H键的伸缩振动、弯曲振

动及其倍频和合频吸收现象。近红外区域波长范围集中在780nm至2500nm之间,物质在此波段对入射光的吸收特性源于分子内部能级跃迁与键能变化所引发的光谱响应。纤维材料中不同组分由于官能团种类、键合方式与分子排列的差异,在近红外区域表现出差异性吸收特征,形成可识别的光谱图。纤维素、涤纶、羊毛等常见纤维原料具有各自特定的主吸收带,其吸收峰位置、强度与含量之间存在量化对应关系<sup>[3]</sup>。近红外吸收机制主要受倍频和合频跃迁规则控制,属过渡强度较弱的吸收过程,因此谱带普遍呈现宽而重叠的特征。由于近红外光能量处于激发电子态与纯振动态之间,其吸收峰位置对分子内氢键、结晶结构、极性环境等高度敏感。分子中轻原子间键长变化引起的势能曲线差异,会进一步影响振动模的耦合方式,导致谱线偏移与形状变化,为建立组分识别与含量定量模型提供理论基础。

#### 1.2 试验材料与仪器

本试验选用三类典型纺织纤维作为近红外光谱响应分析的基础材料,分别为棉纤维、涤纶纤维和锦纶纤维。棉为天然植物性纤维,主成分为纤维素,分子结构中富含羟基(—OH)基团,近红外光谱中易表现出水分吸收与O—H伸缩振动相关特征;涤纶为聚对苯二甲酸乙二酯类聚酯纤维,具有芳香环结构与酯基官能团,在近红外区域具有明确的C=O与C—H伸缩、弯曲吸收响应,结构致密,结晶度高;锦纶则为脂肪族聚酰胺,分子链中含有酰胺键结构,N—H与C=O的组合特征带使其在1470nm与2050nm等位置呈现明显吸收峰,具有良好的拉伸性与吸湿性<sup>[4]</sup>。以上三类纤维种类典型、谱图差异明显,适合作为多组分混纺样品的主成分建模对象。

光谱获取仪器为Antaris II型傅里叶变换近红外分析仪,采用迈克耳孙干涉仪系统,光源配置连续波钨卤灯,检测器为InGaAs光电二极管阵列,具备优异的灵敏度与波长覆盖性能。工作波段设定为1000nm~2500nm,光谱分辨率为 $4\text{ cm}^{-1}$ ,具备对纤维材料中微弱吸收信号的精准识别能力<sup>[5]</sup>。设备集成自动扫描与密闭样品舱结构,有效降低环境干扰。实验平台设有恒温恒湿控制系统,确保样品与光学系统稳定运行,为光谱建模与变量提取提供可靠数据支持。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 纺织纤维比例设定

纤维含量快速检测对混纺比例设定具有严格要求,试验以棉、涤纶、锦纶三类常见纺织纤维为研究对象,其中棉作为主组分构建纤维含量梯度样本序列,以系统评估近红外光谱对混纺纤维主成分的响应特性与含量分辨能力。试验设定每组混纺样品总质量为50g,在混合比例控制方面,棉纤维比例从10%递增至90%,以10%的间隔构建9组不同含量梯度样品,形成覆盖主成分低、中、高含量区间的均匀分布方案,增强模型训练的代表性与鲁棒性。

混纺配样环节采用高精度电子天平实施纤维定量称量,保证各组质量比例误差控制在 $\pm 0.05\text{g}$ 以内,随后引入高速混合器执行30min均质搅拌,以破除初始分布偏差,提升光谱响应一致性。经预处理后采用模压工艺压制成型,样品厚度保持一致,压制密度控制在 $0.45\text{g}/\text{cm}^3$ 至 $0.50\text{g}/\text{cm}^3$ 之间,确保光程均一性。每组样品设定为3片,满足重复检测与光谱平均处理需求。实验环境温度湿度严格控制,避免纤维吸湿、膨胀或静电干扰近红外特征吸收带稳定性,为后续光谱采集与建模分析提供高一致性输入基础。

#### 1.3.2 混纺织物状态光谱采集

近红外光谱采集阶段对混纺织物样品的表面状态与几何尺寸要求严格,旨在确保光谱响应的一致性与可比性。样品裁切尺寸统一设定为 $50\text{mm}\times 50\text{mm}$ ,厚度控制在1.5mm以内,避免因厚度差异引发光程长度变化而影响反射率稳定性。纤维排列方向严格保持与光源照射方向垂直,经由专用样品夹具固定后置于积分球入射窗口中心位置,避免边界效应干扰漫反射光信号。

采集模式采用漫反射扫描方式,使用钨卤灯作为稳定光源,

光谱工作波段设定在1000nm~2500nm区间,步进间隔为2nm,兼顾分辨率与计算效率。扫描光斑直径固定为10mm,光谱分辨率控制在 $4\text{ cm}^{-1}$ ,能够有效解析纤维组分特征吸收带。每组样品进行3次独立扫描,间隔位移5mm,同时搭配自动旋转平台完成角度调整,避免单一区域重复照射导致热积累或局部老化引起的光谱偏差。

为确保光谱采集准确性,扫描舱体温度维持在 $22^\circ\text{C}$ ,相对湿度控制在60%,形成稳定检测环境。背景参考采集频率设为每小时一次,均采用标准白板高反射率面板进行校准,确保光源能量衰减与仪器响应漂移得以实时修正。样品与采集数据一一编号对应,扫描完成后光谱曲线即时显示反射率强度,并通过专业采集软件自动记录原始数据,统一以csv格式导出,供后续波段处理与模型训练使用。反射率信号控制在0.1至0.8区间为有效响应范围,超出部分予以剔除。所有样品采集流程控制在24小时内完成,数据实时归档上传至数据库系统,保证采集的完整性与可溯性。

#### 1.3.3 纺织成分光谱波段筛选

不同纺织纤维在近红外区域的吸收特征差异,主要源于其所含官能团种类、分子链段结构及结晶度水平,表现为各类特征吸收峰在特定波段上的响应强度差异。混纺织物光谱采集完成后,对原始反射率数据进行多元散射校正与一阶导数变换,以削弱背景噪声与散射干扰,再通过标准正态变量变换强化微弱吸收峰的可辨性。在此基础上,对1000nm~2500nm的整个近红外波段范围开展全变量筛查。

以纯棉样品为基准,羟基(—OH)在1410nm与1940nm附近出现强吸收,分别对应伸缩振动的第一泛音与水分吸收合频带;涤纶中芳环C—H在1210nm、酯基C=O在1728nm处具代表性吸收;锦纶的N—H结构则在1470nm与2050nm波段体现酰胺I带与酰胺II带的重叠响应。为高效压缩变量冗余,采用主成分载荷谱分析识别高贡献变量,同时辅以连续投影算法排除共线性干扰,最终从原始千余个波长点中提取出24个具有代表性的特征波段。

筛选出的24个波段均分布于1152nm~2048nm之间,涵盖各类关键官能团吸收峰区域,并以中心波长为索引编号,构建统一的波段变量索引表,作为混纺含量回归建模的主输入特征,用于提升建模效率与预测稳定性。

#### 1.3.4 混纺含量光谱模型训练

混纺纤维含量的定量建模以样品中棉、涤纶、锦纶的质量分数作为响应变量,所筛选出的近红外反射率特征波段作为建模输入变量。训练过程采用偏最小二乘回归(Partial Least Squares Regression, PLSR)方法,分别针对棉涤、棉锦、涤纶三类典型混纺类型建立独立回归方程。试验共设定9组混纺比例,每组配置3片样品,执行3次独立扫描,合计获得81条原始光谱数据。样本经马氏距离算法筛查,剔除异常点后形成建模样本集,确保输入数据质量稳定。

输入光谱变量限定在1152nm~2048nm范围内共24个敏感波段,经标准正态变量变换与一阶导数平滑处理后完成归一化预

处理, 光谱变量与对应含量值按样本顺序统一编码。主成分数量根据累计解释方差大于95%的标准确定为6个, 输入格式统一为样本×波段矩阵结构。模型训练采用“留一交叉验证”方式执行, 逐样本排除测试增强泛化能力。

回归过程包括变量载荷系数分析、预测残差分布校核与拟合曲线稳定性评估, 确保各组模型具有良好的线性拟合性能与预测稳定性。建模结果由系统输出模型参数集, 依变量编号归档, 同时将模型编号与样本原始信息联合录入建模档案库, 为定量分析与模型迁移提供基础支撑。

## 2 试验结果分析

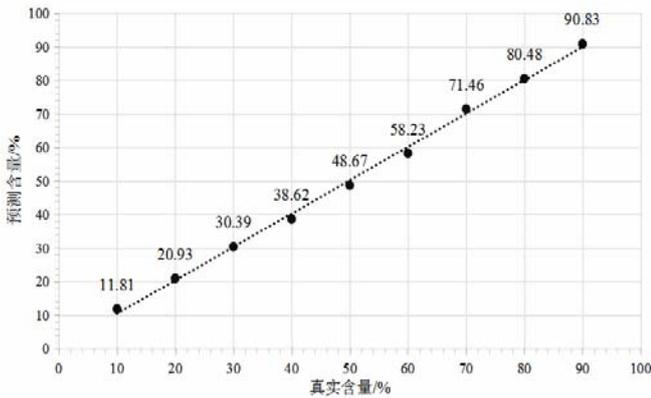


图1 预测含量与真实含量线性关系图

试验建模完成后, 近红外光谱预测值与实际混纺比例之间的拟合效果表现出高度线性特征, 如图1所示。以含棉比例为30%的样品为例, 其预测值为30.39%, 误差不足0.40%, 反映出模型在低比例区间对棉纤维的光谱响应具有高度灵敏性。中间段50%比例样品预测值为48.67%, 略低于实际含量, 但偏差仍处在1.33%以内, 显示出在纤维比例接近均衡条件下模型仍保持稳定响应能力。高比例区段中, 90%棉样品预测值为90.83%, 误差为0.83%, 验证了在主成分占比极高情况下, 光谱模型对主导成分的吸收特征仍具识别优势。全组样品预测结果点位均围绕理想直线分布, 线性趋势明显,  $R^2$  稳定在0.998, 表明变量压缩与建模

参数选择合理, 混纺比例与波段吸收强度存在可解析对应关系。检测过程平均耗时控制在2.32s以内, 扫描阶段无须样品预处理, 亦不依赖复杂解析流程, 极大降低了传统方法中化学试剂处理、样品分离与手动称量等操作步骤的误差干扰与耗时压力, 整体体现出近红外光谱检测路径在时间效率与含量识别精度方面的协同优势, 具备适用于快速批量纤维分类检测与工业在线监测的能力。

## 3 结语

本研究围绕纺织纤维混纺比例设定、光谱特征提取与建模预测过程, 系统探讨了近红外光谱在纤维含量检测中的应用可行性与准确性。试验结果表明, 所构建预测模型在多个配比样本中均表现出较高拟合度, 决定系数稳定, 检测耗时控制在极短时间内, 具备快速、非破坏、高通量的优势, 适用于纺织生产与质检环节中的实时成分识别。后续可结合更多类型纤维样本扩展建模范围, 优化算法稳定性, 提高模型在复杂纺织体系中的适应能力, 推动光谱技术在纤维检测领域的深度应用与智能化发展。

### [参考文献]

- [1]张雪,李娅菲.基于近红外光谱法快速检测几种常见二组分混纺织物纤维含量的研究[J].中国纤检,2025,(05):46-49.
- [2]王海娟,孙剑涛,张雪.近红外光谱法典型模型快速检测纤维含量的研究[J].毛纺科技,2024,52(09):125-131.
- [3]李静,吴浩.采用近红外光谱法快速检测服装纤维含量[J].纺织标准与质量,2023,(05):42-46.
- [4]唐晓萍,王琳,韩晶.近红外光谱法在纺织品纤维含量测定中的研究进展[J].中国口岸科学技术,2024,6(12):35-40.
- [5]王建平.近红外光谱法在纺织纤维含量测定应用中存在的问题与思考[J].中国纤检,2025,(05):22-31.

### 作者简介:

张英(1977--),女,汉族,山东菏泽人,本科,工程师,研究方向:纺织纤维检验检测。