

## 基于光谱双向反射分布函数的纤维物证鉴别

隋春来<sup>1</sup>, 谭勇<sup>1\*</sup>, 张烨<sup>1</sup>, 陈陆<sup>1</sup>, 冯茂林<sup>1</sup>, 刘凤仪<sup>2</sup><sup>1</sup> 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022;<sup>2</sup> 吉林司法鉴定中心, 吉林 吉林 132011

**摘要** 根据 Locard 的交换理论, 纤维证据可以帮助重建犯罪事件。通常, 纤维物证的鉴定采用的是化学成分分析方法, 但该方法会破坏物证的完整性。本文基于光谱双向反射分布函数(BRDF)理论, 建立了相关测试和分析方法, 以解决纤维物证留存的长效性。针对三组纤维样品(每组包含 6 种同色不同材质的纤维样品)建立分析案例的方法, 采用一阶微分和差分法提取光谱特征, 分析光谱 BRDF 数据; 依据光谱曲线提取拟合函数和残差系数, 进行差异化比较; 然后在物理机制上通过建立 Davis 模型模拟光谱 BRDF 曲线, 实现了案例中的物证与可疑结果的有效判定。实验结果为纤维物证特征的鉴别提供了一种有效且无损的探测技术和分析方法, 对刑侦分析和嫌疑人定罪具有重要意义。

**关键词** 光谱学; 光谱鉴别; 双向反射分布函数; 纤维物证; 最小二乘法; Davis 模型

中图分类号 O433

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0930001

## Fiber Evidence Identification Based on Spectral Bidirectional Reflectance Distribution Function

Sui Chunlai<sup>1</sup>, Tan Yong<sup>1\*</sup>, Zhang Ye<sup>1</sup>, Chen Lu<sup>1</sup>, Feng Maolin<sup>1</sup>, Liu Fengyi<sup>2</sup><sup>1</sup> School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;<sup>2</sup> Jilin Judicial Appraisal Center, Jilin, Jilin 132011, China

**Abstract** According to Locard's switching theory, fiber evidence can help reconstruct criminal incidents. Generally, fiber evidence is identified by chemical composition analysis; however, the integrity of material evidence will be destroyed. For this reason, we established a testing and analysis method based on the theory of bidirectional reflectance distribution function (BRDF) to ensure the long-term retention of fiber evidence. To be specific, three groups of fiber samples were selected, with each group containing six kinds of fiber samples with the same color and different materials. The first-order differential and difference methods were used to extract spectral characteristics and analyze spectral BRDF. According to spectral curve fitting, the fitting function and residual coefficient were extracted for differential comparison. From the physical mechanism, a Davis model was built to simulate the spectral BRDF curve. As a result, the material evidence and suspicious results in the cases were effectively determined. The experimental results provide an effective and non-destructive detection technology and analysis method for the identification of fiber evidence characteristics, which greatly facilitates criminal investigation analysis and conviction.

**Key words** spectroscopy; spectral identification; bidirectional reflectance distribution function; fiber evidence; least square method; Davis model

**OCIS codes** 300.6550; 300.6180; 120.5700

收稿日期: 2020-09-14; 修回日期: 2020-11-14; 录用日期: 2020-12-01

基金项目: 吉林省科技发展计划(20190303108SF)

\* E-mail: laser95111@126.com

## 1 引言

Locard 的交换理论<sup>[1]</sup>指出,当两个物体接触时,任何一个物体都会离开或转移自己的一部分到另一个物体的一部分上,每次接触都会在某种程度上留下痕迹。也就是说,只要构成犯罪的,就将始终存在微量物证,包括通常意义上现场的血迹、脚印、指纹等<sup>[2]</sup>。法医以及从事痕迹检测工作的人员可以提取微量物证进行检测、比对和区分,其中,涉案者佩戴或携带的纤维也是刑事调查中的一种常见物证。1988 年,一位名叫 Wiggins 的法医科学家在一宗谋杀案件的检验中发现了受害者身上一些不同寻常的纤维<sup>[3]</sup>,这一发现不仅有助于指证犯罪嫌疑人,还表明了纤维的证据价值。纤维物证的检验方法主要有燃烧法、溶解法、染色法以及显微观察法等有损的检验方法<sup>[4]</sup>。目前,物证检验领域越来越注重物证的无损以及留存追溯,这无疑增加了检验难度。光谱无损检测技术是纤维物证鉴定的新方法。20 世纪 90 年代,Flynn 等借助傅里叶变换红外吸收光谱成像技术<sup>[5]</sup>进行了合成纤维断面形态的特征检验,检验结果表明,样本中的 6 类平行排列合成纤维被辨别出 5 类,这一检验结果使得这项新技术被广泛应用于现场侦查与物证鉴定。

在一桩交通肇事案件的案发现场,孙振文等<sup>[6]</sup>利用光谱成像技术提取了嫌疑车辆及死者衣物上的纤维特征,最终成功区分了 4 种纤维,为案件的最后判定提供了有力证据。齐敏珺等<sup>[7]</sup>使用光谱成像仪对案发现场的纤维物证进行了搜寻,结果表明,在近红外波段下,深色及花色背景中的毛发纤维容易被发现,表明此技术可以应用于现场勘查与检验。

不同纤维的成分、类别、纹理结构以及制造工艺不同,使得大多数纤维制品的散射特性比较复杂,而且构成纤维织品的纤维丝线易混淆并存在着干扰,纤维表面粗糙度不易标定(这一点区别于粗糙度已标定的光滑平面或单纹理平面),给检验带来了一定难度。鉴于此,本文在光谱法检验纤维物证的基础上,结合双向反射分布函数(BRDF),提出一种新的检验方法,即光谱 BRDF 法,并采用该方法对选取的衣料纤维样本进行检验。BRDF 是用来描述材料表面散射特性的一个重要的物理参量<sup>[8-9]</sup>。由于不同种类的纤维所含的基团不同,吸收峰的峰位、峰强度及峰形都存在差别,因此将光谱与 BRDF 相结合,即利用光谱 BRDF 测量方法,实现纤维的比对检验及纤维识别,已成为法医学领域纤维检验最优

佐证方法之一。

## 2 实验原理

在同一观测条件下,被测纤维样品的光谱特征是与 BRDF 中的入射角、入射方位角、散射角、散射方位角、入射波长以及光谱数值强度等相关的函数<sup>[10]</sup>,即光谱 BRDF 能够有效表征目标本身的材质类别、结构组成和表面特性等信息<sup>[11]</sup>。BRDF 的概念最早由美国学者 Nicodemus 于 1970 年提出<sup>[12]</sup>,如图 1 所示,光源沿 $(\theta_i, \varphi_i)$ 方向入射到待测样品和标准板上,沿 $(\theta_r, \varphi_r)$ 方向出射,探测立体角为 $d\Omega_r$ 。

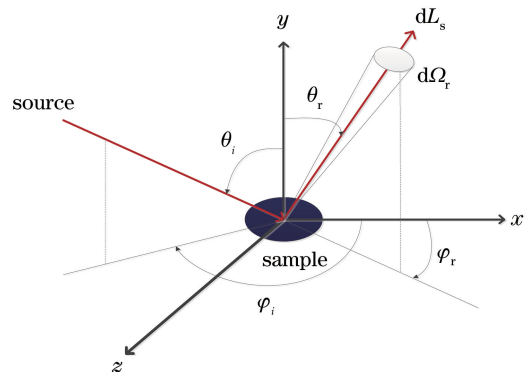


图 1 目标散射光谱测量示意图

Fig. 1 Schematic of target scattering spectrum measurement

当待测样品与标准板在同一入射面积以及同一探测角度下时,被测材料的 BRDF 可以用探测到的样品、标准板的光谱信息以及标准板的半球反射率表示。若以聚四氟乙烯标准白板作为参考板,则它的半球反射率可通过计量进行标定或者用分光光度计加积分球附件测量获得。光谱 BRDF 测量的公式为

$$f_{rs}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{L_s(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)}{L_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)} \cdot \frac{\rho}{\pi} = \frac{O_s(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)}{O_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)} \cdot \frac{\rho}{\pi}, \quad (1)$$

式中: $\rho$  是标准白板的半球反射率; $L_s$  是光线沿 $(\theta_i, \varphi_i)$ 方向入射到待测样品上,沿 $(\theta_r, \varphi_r)$ 方向出射的谱辐射亮度; $L_b$  是光线沿 $(\theta_i, \varphi_i)$ 方向入射到标准板上,沿 $(\theta_r, \varphi_r)$ 方向出射的谱辐射亮度; $L_s$  和  $L_b$  有共同的入射条件,包括入射的谱辐射亮度和角度; $O_s$  是光谱仪接收到的样品的光谱信息; $O_b$  是光谱仪接收到的标准板的光谱信息; $\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r$  分别是入射角、入射方位角、散射角和散射方位角<sup>[13]</sup>。

另外,探测装置捕获的光谱数据由计算机记录,该数据叠加了仪器传递函数、材料表面散射特性、入射光源信息和背景噪声等;因此,需要去除仪器传递

函数、入射光源信息和背景噪声的影响,提取出样品表面材料的散射光谱信息,用于表征样品的物理特性。

### 3 实验设计

若犯罪现场遗留了受害者或犯罪嫌疑人的衣料纤维,通过分析这些纤维的特征,并对这些特征加以区分和对比,就可以为案件的侦破提供佐证。本文主要对纤维样品在可见光波段的散射光谱展开研究。实验仪器由溴钨灯、铁架台、孔径光阑、74UV 望远镜、光纤、QE65PRO 光谱仪、计算机组成。待测目标为标准板和衣料纤维样品,所有衣料纤维样品均为无图案表面均一的样品。如表 1 所示的纤维样品分类表,本次实验将纤维样品分为三组,第一组

表 1 纤维样品的分类表

Table 1 Classification table of fiber samples

Sample color	Sample material	Observation angle / (°)
Purple	Ice silk, rich yarn, sweat cloth, chemical fiber, random hemp, organza	30, 45, 60
Grey	Satin, synthetic fiber, hemp, woolen cloth, cotton, cotton and linen	30, 45, 60
Red	Cotton, wool 1, wool 2, satin, silk, polyester	30, 45, 60

实验室为光学暗室,暗室全封闭设计,暗室内部涂消光漆,墙面反射率小于 3%,对杂散光的吸收效率高,可保证散射光谱的测量精度。光源为溴钨灯,将纤维样品固定在黑色铁架台上,溴钨灯发出一束近平行光束,光束通过孔径光阑照射到样品上。以待测物中心为坐标原点,建立空间坐标系。光源距待测物中心的距离为 350 mm,入射光斑的直径被光阑限制为 20 mm,光源入射角为 45°。探测器在距待测物中心距离为 240 mm 的水平面上移动,通过改变探测器的观测角进行探测,探测器的视场角为 12.7°,探测到的物面面积大于光源照射面积。由于刑侦现场不能进行全角拍摄,因此选取 30°、45°、60°的特征观测角分别采集三组样品的光谱信息并记录存储。实验装置如图 2 所示。

## 4 结果分析与讨论

### 4.1 观测角对 BRDF 光谱的影响

为了验证观测角对 BRDF 光谱的影响,进行了不同观测角的差异性实验。随机选取紫色样品组中的冰丝样品,在 500~960 nm 波段范围内,去除背景噪声、仪器传递函数以及杂散光的影响后,得到了样品在入射角为 45°,观测角分别为 30°、45°和 60°时 BRDF 值随波长变化的谱线及归一化谱线,如图 3 所示。由图 3(a)、(b)可以看出,即使是同一种样

为 6 种紫色的不同材质的纤维样品,第二组为 6 种灰色的不同材质的纤维样品,第三组为 6 种红色的不同材质的纤维样品,并且选取第三组样品中的毛呢纤维 1 和毛呢纤维 2 样品进行物证样品的对比。实验中利用颜色、材质和观测角这三个变量对纤维样品进行分类,保持两个变量不变,改变另一个变量进行实验。样品材质包含材料、质量、外观、纹理、表面粗糙度和丝线经纬方向等特征。紫色样品的表面粗糙度从低到高分别为冰丝纤维、富丽纱纤维、欧根纱纤维、汗布纤维、化纤色丁纤维、乱麻纤维,红色样品的表面粗糙度从低到高分别为绸纤维、缎纤维、棉纤维、毛呢纤维 2、毛呢纤维 1、涤纶纤维,灰色样品的表面粗糙度从低到高分别为合成纤维、缎纤维、麻纤维、棉纤维、棉麻纤维、毛呢纤维。

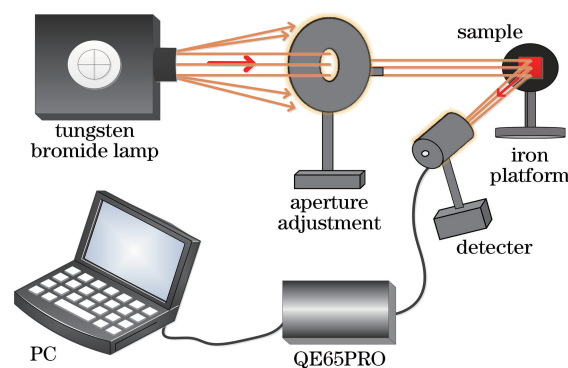


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental device diagram

品,其在各个观测角下的谱线仍然存在差异。因此,将各个观测角下得到的谱线特征进行比对分析,这样可以得到更加准确的结论,也可以使最终的比对结果更具说服力。

### 4.2 模拟案件中纤维物证的特征比对

早在 1985 年,英格兰警方就从 30 件衣物中提取了 2000 份纤维样本进行检验比对,从而锁定了罪犯。这一结果表明了纤维物证特征比对的有效性<sup>[14]</sup>。为验证本实验方法适用于具体的案件,本文选取紫色样品组进行案件模拟,随机从冰丝样品上剪下一部分纤维作为 X 纤维,将其与紫色样品组中 6 种材质的样品进行同实验条件的光谱 BRDF 特征比对测试。

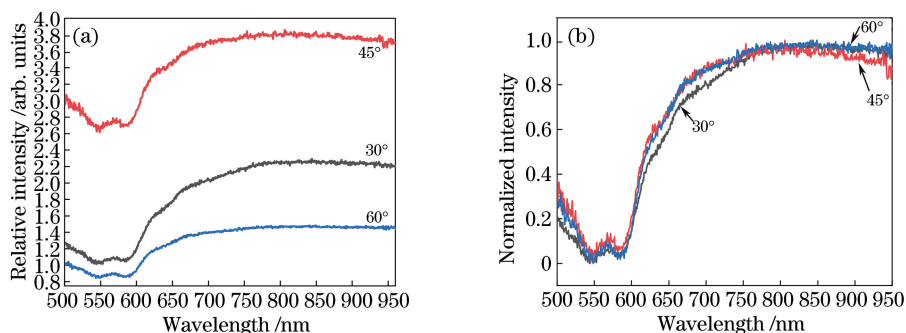


图 3 在入射角为 45°以及观测角分别为 30°、45°、60°时计算得到的紫色样品组中冰丝样品的 BRDF 值随波长变化的谱线。(a) 谱线;(b)归一化后的谱线

Fig. 3 Spectral lines of BRDF value of ice wire sample in purple sample group calculated when the incident angle is 45° and the observation angle is 30°, 45°, and 60° as function of wavelength. (a) Spectral lines; (b) normalized spectral lines

先类比上述类似案件。第一种情况,假设在死者身上发现了 X 纤维,而后锁定嫌疑人 A、B、C、D、E 和 F,在各个嫌疑人的住处分别提取到了冰丝纤维、富丽纱纤维、汗布纤维、化纤色丁纤维、乱麻纤维和欧根纱纤维。

实验条件与前文所述相同,第一组实验中光源的入射角选取 45°,观测角选取 60°,得到了紫色样品组的谱线。图 4(a)所示为 500~950 nm 波段的谱线,可见,各材质样品的谱线区分明显,冰丝纤维与 X 纤维谱线较为相似。采用差分法对提取的可

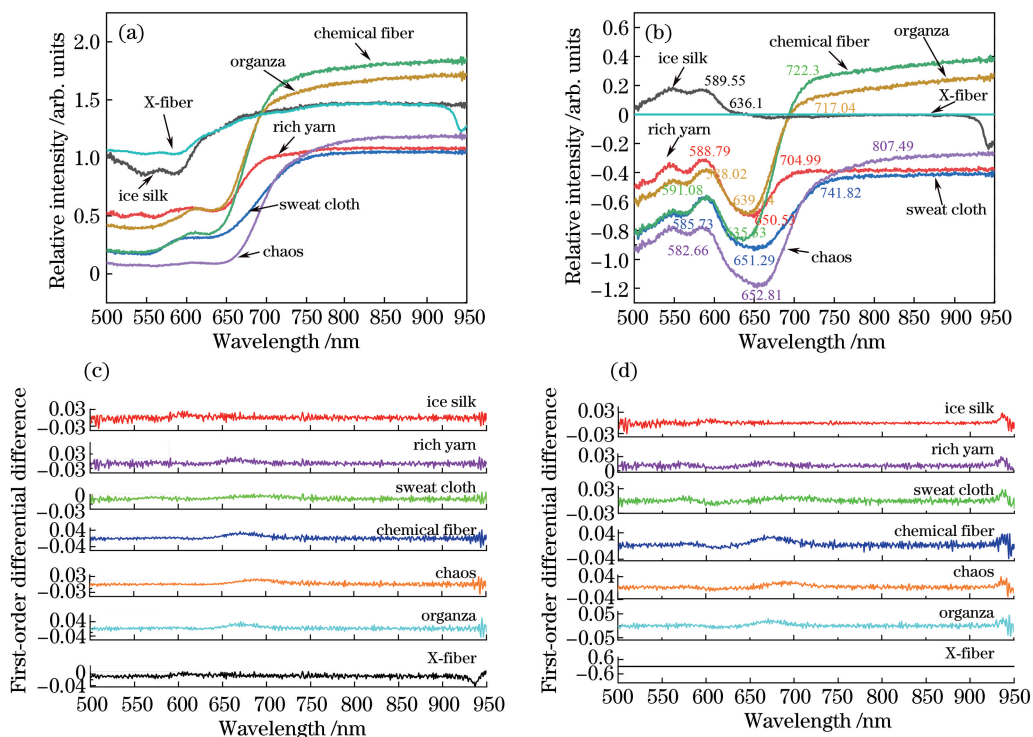


图 4 在入射角为 45°、观测角为 60°时计算得到的紫色样品组中各样品的谱线。(a) BRDF 值随波长变化的谱线;(b) X 纤维与紫色样品组中各样品差值随波长变化的谱线;(c) BRDF 值的一阶微分随波长变化的谱线;(d) X 纤维与紫色样品组中各样品 BRDF 值的一阶微分差值随波长变化的谱线

Fig. 4 Spectral lines of each sample in purple sample group calculated when the incident angle is 45° and observation angle is 60°. (a) Spectral line of BRDF value changing with wavelength; (b) spectral line of the difference value between X-fiber and each sample in purple sample group as a function of wavelength; (c) spectral line of the first-order differential of BRDF value varying with the wavelength; (d) spectral line of the first-order differential difference of BRDF value between X-fiber and each sample in purple sample group as a function of wavelength

疑纤维与 X 纤维作差,得到如图 4(b)所示的结果。可见:冰丝纤维的 BRDF 值与 X 纤维的差值在 589.55 nm 处开始呈明显的下降趋势,在 636.1 nm 处开始变化平缓并在 0 附近波动,而其他纤维与 X 纤维的差值谱线具有相似的趋势,都是在图 4(b)标注的谱线拐点对应的波长处开始呈下降趋势,在下一谱线拐点对应的波长处呈上升趋势,而后在下一谱线拐点对应的波长处趋于平缓。对各材质进行一阶微分,得到了如图 4(c)所示的结果。可见:除冰丝纤维外,各谱线仍旧区分明显。再将对应波段的

各纤维谱线与 X 纤维谱线进行差分,得到如图 4(d)所示的结果。可见:冰丝纤维样品与 X 纤维的差值仍旧在 0 附近波动,而其他纤维与 X 纤维的差值较大。综上所述,可怀疑 X 纤维为冰丝纤维。

为进一步确定 X 纤维,令入射角不变,选取观测角为 45°,得到如图 5 所示的结果。可见:各材质的谱线以及各谱线的一阶微分在此观测角下仍区分明显,冰丝纤维与 X 纤维的谱线仍旧相似,且对应波段的冰丝样品与 X 纤维的差值及一阶微分差分仍在 0 附近。

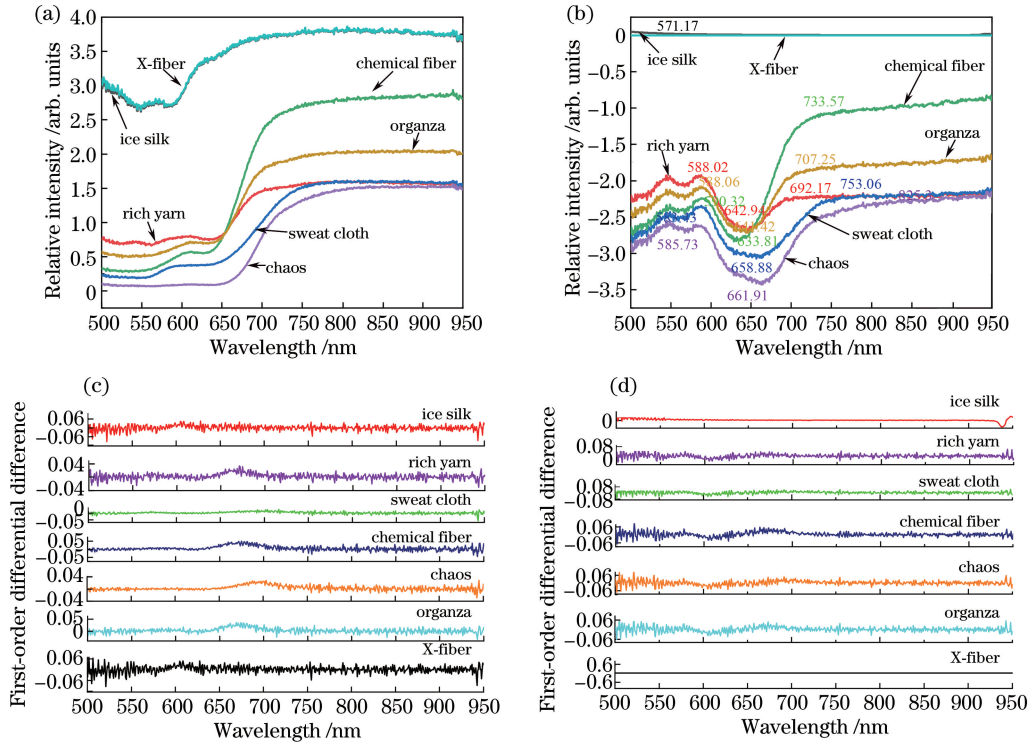


图 5 在入射角为 45°、观测角为 45°时计算得到的紫色样品组中各样品的谱线。(a) BRDF 值随波长变化的谱线;(b) X 纤维与紫色样品组中各样品差值随波长变化的谱线;(c) BRDF 值的一阶微分随波长变化的谱线;(d) X 纤维与紫色样品组中各样品 BRDF 值的一阶微分差值随波长变化的谱线

Fig. 5 Spectral lines of each sample in purple sample group calculated when the incident angle is 45° and observation angle is 45°. (a) Spectral line of BRDF value changing with wavelength; (b) spectral line of the difference value between X-fiber and each sample in purple sample group as a function of wavelength; (c) spectral line of the first-order differential of BRDF value varying with the wavelength; (d) spectral line of the first-order differential difference of BRDF value between X-fiber and each sample in purple sample group as a function of wavelength

保持入射角不变,将观测角选取为 30°时,得到了如图 6 所示的结果,图 6 再次印证了上述结论,基本可以确定 X 纤维即为冰丝纤维,为锁定嫌疑人 A 提供一个有力的佐证。

综上所述,光谱 BRDF 测量方法可用于纤维物证的鉴别。

### 4.3 最小二乘法拟合结果分析

第二种情况,假设在死者身上发现了 Y 纤维,

而后锁定嫌疑人 A、B、C、D、E 和 F,在各嫌疑人住处分别提取到了灰色样品组中的麻纤维、毛呢纤维、棉纤维、缎纤维、合成纤维和棉麻纤维。

实验条件不变,选取入射角为 45°、观测角为 30°时计算得到的 BRDF 值进行最小二乘法拟合。最小二乘法从误差拟合的角度对回归模型进行参数估计或系统辨识,对测量数据进行处理后的残余误差平方和最小,即在满足  $\sum \epsilon_i^2$  最小的条件下来求

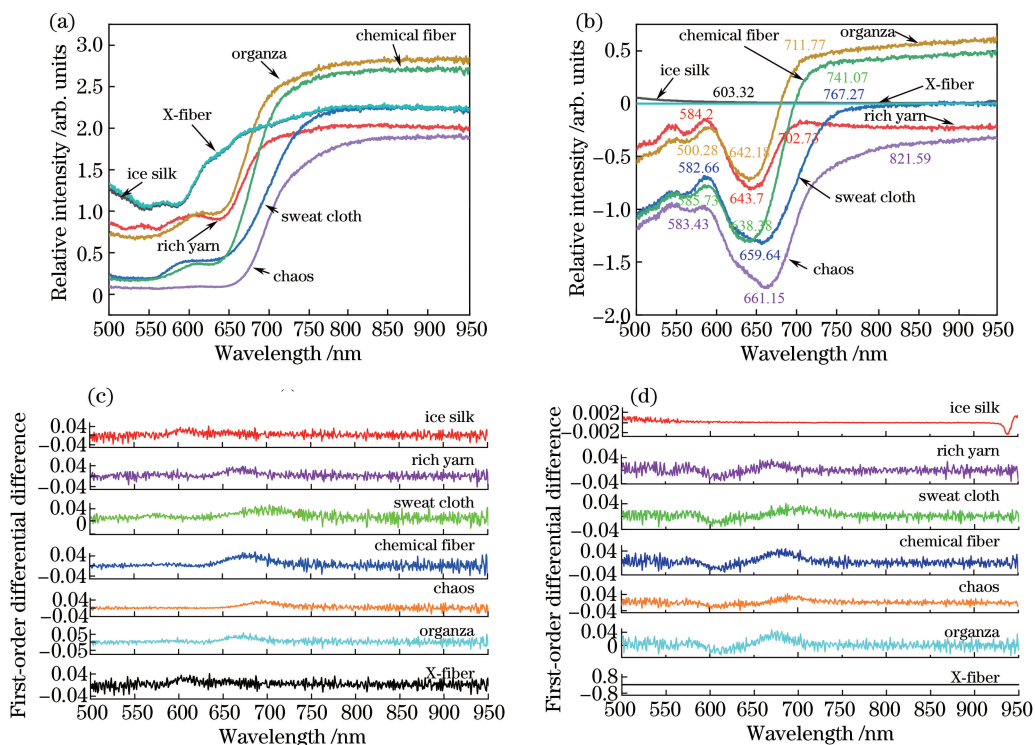


图 6 在入射角为  $45^\circ$ 、观测角  $30^\circ$  时计算得到的紫色样品组中各样品的谱线。(a) BRDF 值随波长变化的谱线; (b) X 纤维与紫色样品组中各样品差值随波长变化的谱线; (c) BRDF 值的一阶微分随波长变化的谱线; (d) X 纤维与紫色样品组中各样品 BRDF 值的一阶微分差值随波长变化的谱线

Fig. 6 Spectral lines of each sample in purple sample group calculated when the incident angle is  $45^\circ$  and observation angle is  $30^\circ$ . (a) Spectral line of BRDF value changing with wavelength; (b) spectral line of the difference value between X-fiber and each sample in purple sample group as a function of wavelength; (c) spectral line of the first-order differential of BRDF value varying with the wavelength; (d) spectral line of the first-order differential difference of BRDF value between X-fiber and each sample in purple sample group as a function of wavelength

解。选择最佳拟合曲线的标准为:使总的拟合误差 (即残差平方和) 最小。进行最小二乘法拟合后可以

得到如图 7 所示的结果。由图 7 可以粗略看出一系列成对的数据点散落在拟合函数曲线附近。在回归

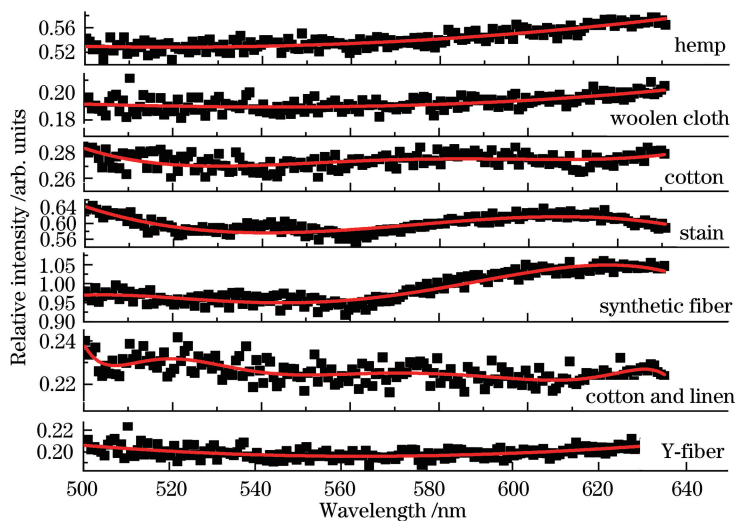


图 7 在入射角为  $45^\circ$ 、观测角为  $30^\circ$  时计算得到的灰色样品组中各样品的 BRDF 值及最小二乘法拟合曲线  
Fig. 7 BRDF value and least square fitting curve of each sample in gray sample group calculated when incidence angle is  $45^\circ$  and observation angle is  $30^\circ$

过程中可借助相关系数  $R$  判断拟合函数的好坏。 $R$  的计算公式为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i - \bar{\lambda})(F_{ri} - \bar{F}_r)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\lambda_i - \bar{\lambda})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (F_{ri} - \bar{F}_r)^2}}, \quad (2)$$

式中： $\lambda_i$  为各纤维样品对应的中心波长，取值为 400~720 nm； $\bar{\lambda}$  为平均波长； $F_{ri}$  为各纤维样品的平均反射率； $\bar{F}_r$  为样品的平均反射率； $n$  为纤维样品的样本数量。

表 2 入射角为 45°、观测角为 30° 时计算得到的灰色样品组中各样品 BRDF 值的最小二乘法拟合曲线的参数

Table 2 Least square fitting parameters of BRDF value of each sample in gray sample group calculated when incident angle is 45° and observation angle is 30°

Sample type	Fitting curve function	Sum of squares of residuals	$R^2$
Satin	$F_r = 53.41 - 0.28\lambda + 4.85\lambda^2 - 2.82\lambda^3$	0.01875	0.40620
Synthetic fiber	$F_r = -457.84 + 3.34\lambda - 0.010\lambda^2 + 1.09\lambda^3 - 4.92\lambda^4$	0.02664	0.30828
Hemp	$F_r = 1.29 - 0.0025\lambda + 1.265\lambda^2 + 1.48\lambda^3$	0.00909	0.43141
Woolen cloth	$F_r = 0.0059 + 0.00175\lambda - 4.574\lambda^2 + 3.638\lambda^3$	0.00311	0.89216
Cotton	$F_r = 119.095 - 0.83\lambda + 0.00218\lambda^2 - 2.53\lambda^3$	0.00473	0.70283
Cotton and linen	$F_r = 12.274 - 0.087\lambda + 2.364\lambda^2 - 2.865\lambda^3 + 1.304\lambda^4$	0.00394	0.78362
Y-fiber	$F_r = 1.26789 - 0.0044\lambda + 5.49\lambda^2 - 1.8833\lambda^3$	0.00314	0.88796

#### 4.4 基于 Davis 模型的纤维物证特性仿真分析

Davis 模型是 BRDF 模型的一种，该理论模型由 Davis 于 1954 年提出<sup>[16]</sup>。该模型主要通过假设

相关系数  $R$  越趋近于 1，拟合效果越好<sup>[15]</sup>。拟合曲线函数中的各参数如表 2 所示，表 2 中的  $\lambda$  为波长(单位为 nm)， $F_r$  为各样品的反射率(单位为 arb. units)。各样品的残差平方和及相关系数  $R$  的平方( $R^2$ )均不相同，且区分明显，但 Y 纤维与毛呢纤维的残差平方和、相关系数  $R$  的值相近，可以锁定嫌疑人就是在其住处发现毛呢纤维的 B 嫌疑人。这说明，在光谱 BRDF 测量方法的基础上，基于最小二乘法的多项式拟合方法是一种更加精确的纤维比对鉴别方法。

不规则表面的高度起伏在其平均值附近呈高斯分布，并基于基尔霍夫近似来描述电磁能量在粗糙表面散射的数学公式。该模型的公式为

$$f_r = \frac{132\rho'}{\pi \cos \theta_i} \exp \left[ - \left( 4\pi \frac{\rho}{\lambda} \cos \theta_i \right)^2 \right] + \frac{\rho}{\cos \theta_i \cos \theta_r} \pi^3 (\cos \theta_i + \cos \theta_r)^4 \cdot \left( \frac{a}{\lambda} \right)^2 \left( \frac{\sigma}{\lambda} \right)^2 \cdot \exp \left\{ - \left( \frac{\pi a}{\lambda} \right)^2 [\sin^2 \theta_i + \sin^2 \theta_r + 2 \sin \theta_i \sin \theta_r \cos(\varphi_i - \varphi_r)] \right\}, \quad (3)$$

式中： $\rho'$  为反射率； $\lambda$  为波长； $a$  为表面自相关长度； $\sigma$  为表面粗糙度的均方根。Davis 模型的物理意义明确且应用范围较广<sup>[17]</sup>，因此本文选取该模型，利用 MATLAB 2016a 软件，进一步研究纤维粗糙表面的光散射特性。通过查询资料<sup>[18-19]</sup> 得到了一组表面粗糙度与自相关长度的对应关系，对应于红色样品组中的绸纤维、棉纤维和毛呢纤维 1，将其作为模型参数，计算取定参数后纤维粗糙表面 Davis 理论模型的 BRDF。对应关系如表 3 所示。

选取入射角为 45°、入射方位角为 45°、探测角为 30°、探测方位角为 135°，并将上述三种不同的红色纤维样品的表面粗糙度和自相关长度代入 Davis 模型公式，得到的结果如图 8 所示。可见，三种样品的 BRDF 值在可见光波段随波长变化的趋势基本相似，但 BRDF 值的大小区别明显。

表 3 红色样品组中各样品表面粗糙度与自相关长度的对应关系

Table 3 Relationship between surface roughness of each sample in red sample group and autocorrelation length

Sample(red)	Surface roughness / $\mu\text{m}$	Autocorrelation length / $\mu\text{m}$
Silk	0.2	7.2061
Cotton	0.4	5.1638
Woolen cloth 1	0.8	5.0435

图 8 中 500~950 nm 特征波段的仿真结果如图 9 所示。

从图 9 的纵坐标可以明显看出绸纤维样品的 BRDF 值最大，其次是棉纤维样品，最小的是毛呢纤维 1 样品的 BRDF 值，三种样品的 BRDF 值区分明显。仿真结果验证了纤维材质、编织结构、表面粗糙度是造成各样品光学散射特性差异明显的一个因素。

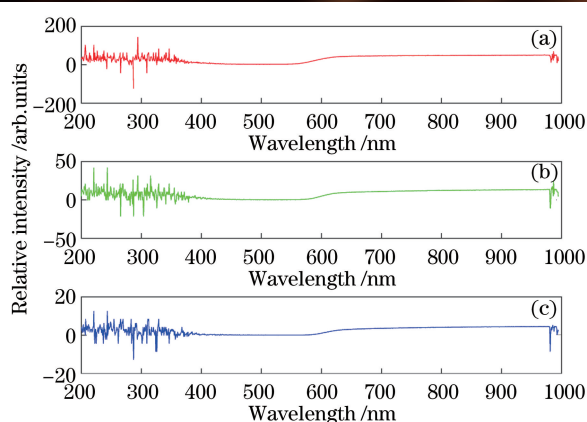


图 8 红色样品组中三种纤维样品的 Davis 模型仿真结果。

(a) 绸纤维样品; (b) 棉纤维样品; (c) 毛呢纤维样品 1

Fig. 8 Simulation results of three samples in red sample group by Davis model. (a) Silk sample; (b) cotton sample; (c) woolen sample 1

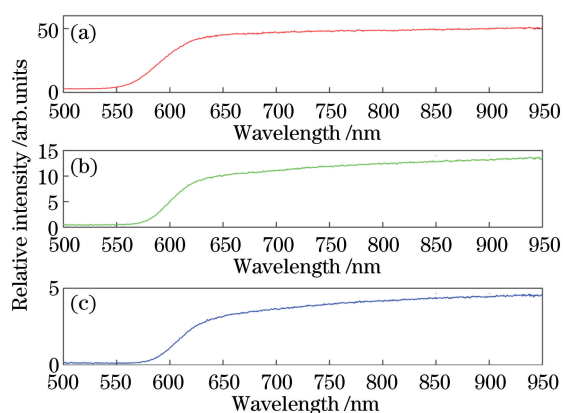


图 9 红色样品组中三种纤维样品在 500~950 nm 波段的 Davis 模型仿真结果。(a) 绸纤维样品; (b) 棉纤维样品; (c) 毛呢纤维样品 1

Fig. 9 Simulation results of three samples in red sample group in wavelength of 500–950 nm by Davis model. (a) Silk sample; (b) cotton sample; (c) woolen sample 1

## 5 结 论

本文基于光谱 BRDF 理论,开展了纤维物证光谱特性与鉴别方面的研究,以为司法鉴定提供佐证。首先搭建实验装置,并测量多组纤维物质的光谱 BRDF 数据,采用案例分析方法对现场可疑纤维的多角度光谱数据进行特征分析和鉴别;然后进行了基于最小二乘法的多项式光谱拟合,以寻找最佳匹配结果;之后采用 Davis 模型进行了二维纤维特性的仿真分析,从三个不同侧面验证了光谱 BRDF 分析方法在司法纤维物证鉴别中的有效性。所提方法以非接触、非破坏的检测方式丰富了纤维物证的

鉴别方法,实现了物证留存的长效性。本研究团队将进一步对纤维的光谱 BRDF 开展研究,为痕量纤维物质的鉴定提供新方法。

## 参 考 文 献

- [1] Kondo T, Kobayashi K, Murohara T. Nitric oxide signaling during myocardial angiogenesis [J]. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 2004, 264(1/2): 25-34.
- [2] Morville J, Romanini D, Kachanov A A, et al. Two schemes for trace detection using cavity ringdown spectroscopy[J]. *Applied Physics B*, 2004, 78(3/4): 465-476.
- [3] Sultana N, Gunning S A, Furst S J, et al. Direct analysis of textile dyes from trace fibers by automated microfluidics extraction system coupled with Q-TOF mass spectrometer for forensic applications [J]. *Forensic Science International*, 2018, 289: 67-74.
- [4] Yao W T, Gao W R. Development and application of endoscopic optical coherence tomography [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 070002. 姚文涛, 高万荣. 内窥镜光学层析成像的发展和应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 070002.
- [5] Deng C L, Tong J J, Gao M G, et al. Simulation of tomographic reconstruction algorithms for open-path Fourier transform infrared spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0707001. 邓矗岭, 童晶晶, 高阔光, 等. 开路傅里叶变换红外光谱层析重建算法仿真 [J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0707001.
- [6] Sun Z W, Quan Y K, Sun Y Y. Statistical analysis of trace evidence identification in 545 traffic accidents [J]. *Chinese Journal of Forensic Medicine*, 2013, 28(4): 344-345. 孙振文, 权养科, 孙玉友. 545 例交通事故微量物证鉴定的统计分析 [J]. *中国法医学杂志*, 2013, 28(4): 344-345.
- [7] Qi M J, Chen Y H, Wang X Q, et al. Preliminary application of NIR spectral imaging technique in searching for crime scene evidence [J]. *Forensic Science and Technology*, 2017, 42(1): 15-20. 齐敏珺, 陈奕桦, 王新全, 等. 近红外光谱成像技术在现场物证搜索中的应用研究 [J]. *刑事技术*, 2017, 42(1): 15-20.
- [8] Zhao Z Y, Qi C, Dai J M. Design of multi-spectrum BRDF measurement system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(3): 168-171.
- [9] Khan M M R, Hossain M E, Jayaraman R. Effect of fiber surface treatments on the strength of bonding between dyneema<sup>®</sup> fiber and HDPE matrix [J].



- Composite Interfaces, 2020, 27(12): 1061-1083.
- [10] Gao M, Song C, Gong L. Analysis of polarization characteristics about rough surface light scattering based on polarized bidirectional reflectance distribution function[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(12): 1213002.  
高明, 宋冲, 巩蕾. 基于偏振双向反射分布函数的粗糙面光散射偏振特性研究[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1213002.
- [11] Wang X, Zhang Y S, Xu C, et al. Bidirectional reflectance distribution function modeling approach of space objects' fold material[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1024001.  
汪夏, 张雅声, 徐灿, 等. 空间目标褶皱材质 BRDF 建模方法[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1024001.
- [12] Nayar S K, Ikeuchi K, Kanade T. Surface reflection: physical and geometrical perspectives [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(7): 611-634.
- [13] Feng S Q, Song W, Wang Y, et al. Scattering properties of core-shell structure of mist wrapped dust particles [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(12): 3218-3223.  
冯诗淇, 宋薇, 王妍, 等. 水雾包裹沙尘颗粒核壳结构的散射特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(12): 3218-3223.
- [14] Forensic Science. Discussion on forensic science part four: fiber testing from the detection of two cases [EB/OL]. (2006-06-01) [2020-09-14]. [http://blog.sina.com.cn/s/blog\\_49a9d71201000430.html](http://blog.sina.com.cn/s/blog_49a9d71201000430.html).  
法庭科学. 法庭科学漫谈之四: 从两起案件的侦破谈纤维检验 [EB/OL]. (2006-06-01) [2020-09-14]. [http://blog.sina.com.cn/s/blog\\_49a9d71201000430.html](http://blog.sina.com.cn/s/blog_49a9d71201000430.html).
- [15] Kim H J, Kwon K C, Shim D S. Fast algebraic calibration of MEMS tri-axis magnetometer for initial alignment using least square method [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2020, 15(5): 2361-2372.
- [16] Shen Y J, Zhang Z M, Tsai B K, et al. Bidirectional reflectance distribution function of rough silicon wafers[J]. International Journal of Thermophysics, 2001, 22(4): 1311-1326.
- [17] Bai L, Wu Z, Cao Y, et al. Spectral scattering characteristics of space target in near-UV to visible bands[J]. Optics Express, 2014, 22(7): 8515-8524.
- [18] Goch G, Peters J, Lehmann P, et al. Requirements for the application of speckle correlation techniques to on-line inspection of surface roughness [J]. CIRP Annals, 1999, 48(1): 467-470.
- [19] Lehmann P, Patzelt S, Schöne A. Surface roughness measurement by means of polychromatic speckle elongation[J]. Applied Optics, 1997, 36(10): 2188-2197.