

基于光学相干层析技术的电工胶带检验方法

刘康康¹, 孟利¹, 张宁^{2,3*}, 孙振文², 谢彬³, 刘星星³, 许小京²

¹中国人民公安大学刑事科学技术学院, 北京 100038;

²公安部物证鉴定中心, 现场物证溯源技术国家工程实验室, 北京 100038;

³江西兴国县公安局, 江西 赣州 342400

摘要 光学相干层析(OCT)技术是一种无损、高分辨率、快速的断层成像检验技术。电工胶带是法庭科学领域的一种重要物证。利用自主搭建的频域 OCT 系统对 10 种不同品牌的红色电工胶带进行 OCT 成像检验。从电工胶带的二维 OCT 图像中提取光程、散射强度比、信号峰个数、衰减系数等特征参数,比较各参数在不同样品之间的统计学显著性差异。对电工胶带样品进行三维 OCT 图像重建,获得样品的横截面图像。实验发现,上述特征可以有效区分不同品牌的电工胶带。OCT 技术可以实现对物证样品的原位、无损、实时检验,且操作便捷、分辨率高,将为法庭科学电工胶带物证检验提供一种新的方法。

关键词 成像系统; 相干光学层析; 无损检测; 电工胶带; 光学衰减系数

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.011101

Characterization of Electrical Tapes by Optical Coherence Tomography

Liu Kangkang¹, Meng Li¹, Zhang Ning^{2,3}, Sun Zhenwen²,
Xie Bin³, Liu Xingxing³, Xu Xiaojing²

¹ School of Forensic Science, People's Public Security University of China, Beijing 100038, China;

² National Engineering Laboratory for Forensic Science, Institute of Forensic Science, Ministry of Public Security, Beijing 100038, China;

³ Public Security Bureau of Xingguo County, Ganzhou, Jiangxi 342400, China

Abstract Optical coherence tomography (OCT) is a non-destructive, high-resolution, and fast tomographic imaging technique. Electrical tape is an important physical evidence in the forensic science. A self-built frequency-domain OCT system is employed to obtain two-dimensional (2D) cross-sectional OCT images of electrical tapes from ten different brands. The optical path, the scattering intensity ratio, the number of signal peaks, and the attenuation coefficient are extracted from the 2D cross-sectional OCT images of electrical tapes. Statistically significant differences of the parameters are compared in those different samples. Meanwhile, three-dimensional (3D) OCT image reconstruction of the electrical tapes is also implemented to create transverse sectional images beneath the surface. The experiments demonstrate that OCT provides a series of new features to effectively distinguish different brands of electrical tapes. OCT provides *in-situ*, non-destructive, high-resolution, and easily operated real-time examination, and it is a promising method for electrical tape examination in the forensic science.

Key words imaging system; optical coherence tomography; non-destructive examination; electrical tape; optical attenuation coefficient

OCIS codes 110.1650; 110.2350; 110.4500; 110.6955

收稿日期: 2017-06-29; 收到修改稿日期: 2017-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(61505034)、公安部技术研究计划(2016JSYJC12)

作者简介: 刘康康(1994—),男,硕士研究生,主要从事刑事图像技术方面的研究。E-mail: liukangk01@163.com

导师简介: 许小京(1959—),男,研究员,硕士生导师,主要从事刑事图像技术方面的研究。

E-mail: xuxiaojing@cifs.gov.cn

* 通信联系人。E-mail: zhangning@cifs.gov.cn

1 引言

1.1 研究背景

电工胶带又称绝缘胶带,是日常生活中较为常见的物品,也是爆炸、盗窃、绑架等案件现场经常出现的物证之一^[1]。通过对现场遗留胶带与嫌疑人处提取胶带的比对检验,可建立嫌疑人与犯罪现场的关联,为揭露和证实犯罪提供证据。传统的检验方法需要将胶带剥离后送至实验室进行检验,难以实现无损、原位检验,不利于物证保全,且操作复杂,耗时长。为克服传统检验方法的缺陷,本文引入光学相干层析(OCT)技术对电工胶带进行成像检验研究。

1.2 现有方法概述

电工胶带一般由带基及黏合剂组成。已有报道的电工胶带检验方法包括扫描电镜/能谱法(SEM/EDS)^[2]、X射线荧光光谱法(XRF)^[3]、裂解气相色谱-质谱法(PY-GC/MS)^[4]、宽度测量、厚度检验等方法^[5]。

扫描电镜/能谱法^[2]可以定量分析电工胶带带基中主体元素(Cl和Ca)的相对含量,但当主体元素含量相同或相近时就难以区分。X射线荧光光谱法^[3]可以对电工胶带带基中的微量元素进行定性分析。裂解气相色谱-质谱法^[4]常用于电工胶带黏合剂的检验。以上方法操作均较复杂,需要对样本进行切片及预处理,并且有可能破坏胶带上留有的指纹等生物物证。也有利用显微镜和其他物理方法^[5]对电工胶带带基进行检验,测量其宽度、厚度等物理信息来区分不同品牌的电工胶带,虽然操作相对简便,但特征较少,对电工胶带的区分效果不理想。

1.3 OCT技术

OCT技术是一种利用低相干原理成像的光学

检验方法,具有原位、无损、快速、高分辨率、断层成像等优势^[6],在生物医学^[7-8]、珠宝鉴定^[9]、文物鉴定^[10-11]、陶瓷检测^[12-13]等方面均有不同程度的应用。近年来法庭科学领域也引入了OCT技术,用于油漆物证检验^[14]、假币鉴别^[15]、潜指纹显现^[16]等。

本文利用OCT成像技术对电工胶带进行无损、原位成像,探索该技术用于区分不同品牌电工胶带的可行性。首先,利用OCT技术的微米级高分辨率断层成像特性,为现有的电工胶带检验提供新的区分特征,为认定或排除电工胶带提供新方法;其次,由于OCT技术采用低功率近红外光源成像,因此无需接触样品即可实现无损成像,非常适合用于电工胶带的初检。另外,OCT系统成像速度快(实时二维成像),操作便捷,有望大大提高电工胶带的检验效率。

2 材料和方法

2.1 电工胶带样品

实验选取市场上常见的10种品牌的红色电工胶带,样品照片如图1所示,详细信息见表1。

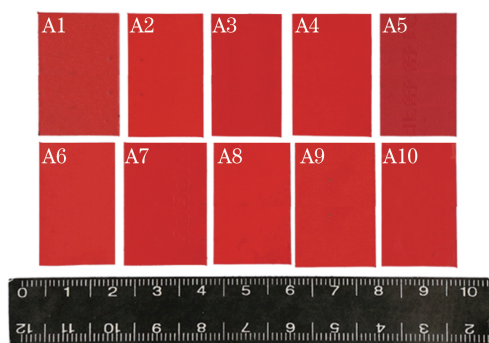


图1 电工胶带样品图

Fig. 1 Photograph of electrical tape samples

表1 电工胶带样品信息表

Table 1 Information of electrical tape samples

No.	Brand	Manufacturer
A1	TESA	TESA, Germany
A2	COBRA	Huaxia Industry Co., Ltd., Hebei, China
A3	YOUXIN	Youxin Packaging Materials Co., Ltd., Dongguan, China
A4	DELI	Sino-American DELI Tools Co., Ltd., Yuyao, China
A5	SHUWANG	Shushi Industrial Co., Ltd., Hubei, China
A6	WANDE	Yahua Adhesive Product Co., Ltd., Tianjin, China
A7	VINI	Denka Co., Ltd., Japan
A8	TIANTAN	Tiantan Adhesive Product Co., Ltd., Beijing, China
A9	HUWANG	Huaxia Industry Co., Ltd., Hebei, China
A10	SINCERE	Sincere Adhesive Product Co., Ltd., Ningbo, China

2.2 OCT 系统

实验利用自主搭建的一套光纤化频域 OCT 系统^[14],如图 2 所示。相比传统的时域 OCT,频域 OCT 技术省去了参考臂镜面机械扫描过程,成像速度大大提高,可实现二维甚至三维实时成像,同时可减小周围环境对成像的影响,比如样品的微小移动导致的图像模糊问题;其次,频域 OCT 技术信噪比高,图像更清晰,捕捉小信号的能力更强,对发现微小特征结构信息有极大帮助。此外,频域 OCT 具有很好的相位稳定性。

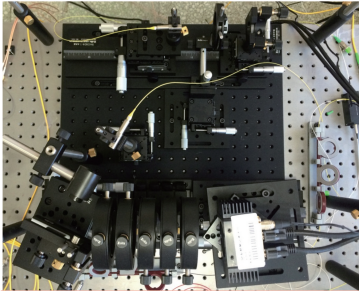


图 2 频域 OCT 系统实物图

Fig. 2 Photograph of frequency-domain OCT system

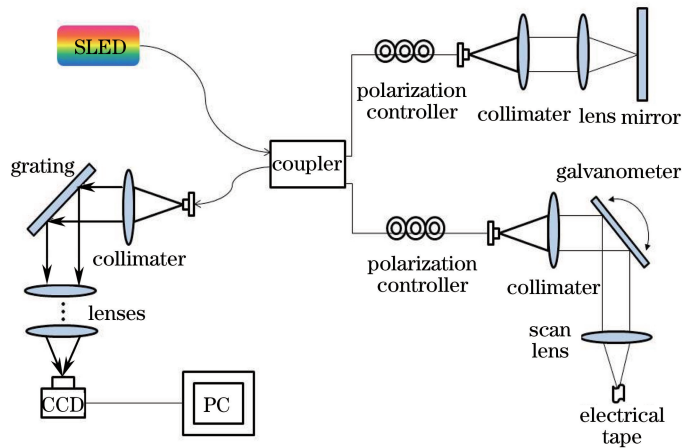


图 3 频域 OCT 系统原理图

Fig. 3 Schematic of frequency-domain OCT system

3.1 二维 OCT 断层图像

不同品牌的电工胶带制作材质或原料比例有所差异,因此对光的吸收和散射能力也不同。OCT 系统光源为近红外光,对电工胶带有一定穿透能力。电工胶带上、下表面分别和空气形成两个介质变换层,光在不同介质层交界面会有很强的反射和散射,在图中表现为较强的信号,即较亮的线,如图 4(a)所示。实验时,控制入射到不同样品上的光功率一致,入射

系统原理如图 3 所示。系统采用一台宽带超辐射发光二极管(SLED)光源,光源中心波长 832 nm,半峰全宽 60.4 nm,发射功率 13 mW,照射到样品上功率约 6 mW。系统纵向分辨率为 6 μm ,横向分辨率为 7.7 μm ,最大线扫描速度为 70 kHz。当系统积分时间为 50 μs 时,系统信噪比约为 100 dB。样品臂的横向扫描由一组二维扫描振镜完成,并与探测器帧信号采集同步。扫描控制、数据采集和图像显示功能使用一套自主编写程序实现。

3 结果和讨论

实验获取上述 10 种电工胶带样品的二维 OCT 图像,提取了光程、散射强度比、信号峰个数和衰减系数 4 个特征参数,均匀选取每种电工胶带样品的 5 个不同部位分别进行成像和测量,计算得到相应特征参数的均值及标准差,通过独立 t 检验分析这些参数在不同样品之间的统计学显著性差异,尽量减小样品本身的空间差异对实验结果造成的影响。同时,利用 OCT 系统对电工胶带样品进行三维 OCT 图像重建,获取其横截面图像,得到内部形态特征。

角度选择非正入射以避免镜面强返回光的噪声,并在整个实验过程中保持入射角度不变。通过样品二维 OCT 断层图像,可以发现在电工胶带上、下表面呈现不同的信号强度,上表面反射和散射光强,下表面由于一部分光被胶带散射或吸收,反射和散射光较弱,胶带内部的反射和散射光也呈现衰减趋势。在样品的纵向一线信号图中,可以观察到电工胶带样品上、下表面信号峰的强度有明显差异,如图 4(b)所示。

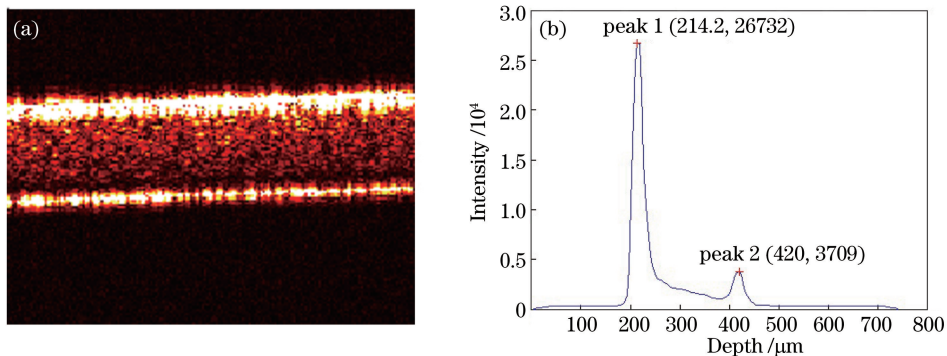


图4 电工胶带(a)二维 OCT 断层图像和(b)纵向一线信号图

Fig. 4 (a) 2D OCT cross-sectional image and (b) A-scan signal of an electrical tape

3.2 光程

OCT 系统根据低相干光原理进行成像,因此获取的样品二维 OCT 断层图像上、下界面之间的厚度实际代表的是光程(样品真实厚度 \times 折射率)。不同生产厂家生产的电工胶带,由于工艺、材料的不同,厚度和折射率也有所不同,因此光程将呈现差异。如图 5 所示,样品纵向一线信号图中,横坐标表

示深度(样品的纵向深度),纵坐标表示光强,图像中的两个峰分别代表电工胶带上、下表面的信号,两个峰的横坐标之差即为胶带的光程。通过样品 A1 和 A2 二维 OCT 断层图像,可以发现两样品的光程明显不同,通过纵向一线信号图可测得两者光程分别为 $168 \mu\text{m}$ 和 $290 \mu\text{m}$ 。实验采集到每种样品的 5 组光程数据均值及标准差如表 2 所示。

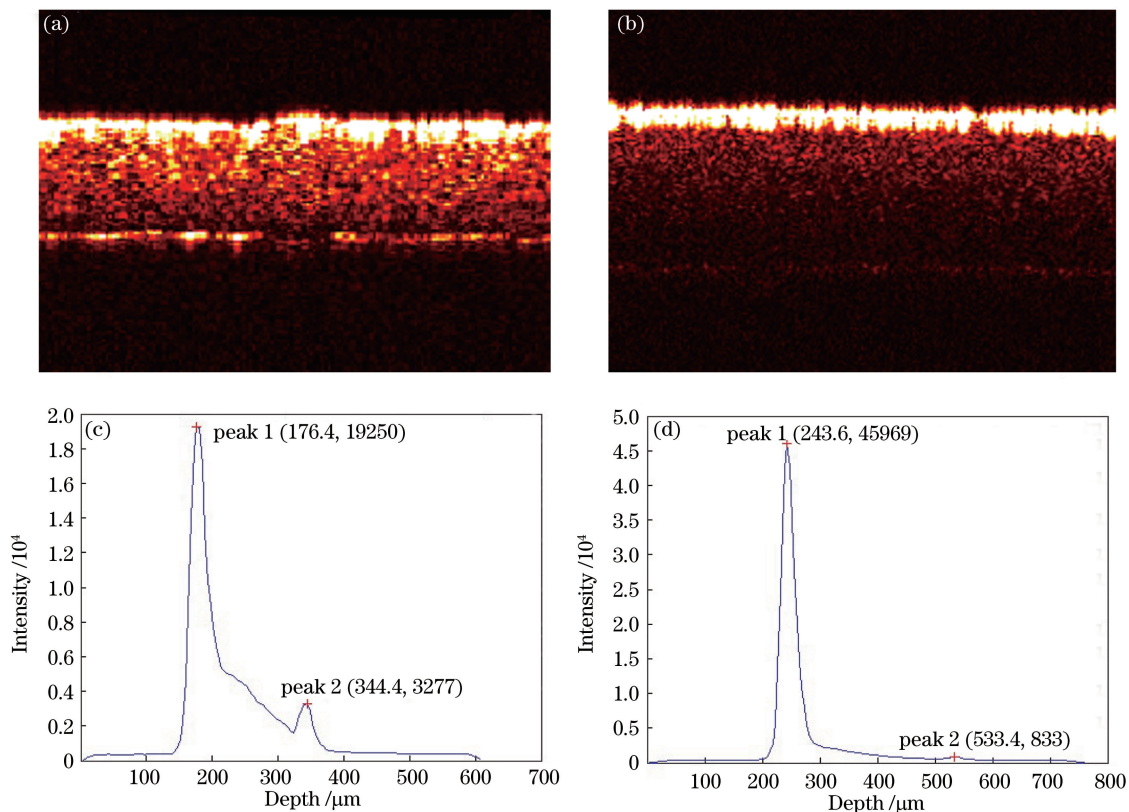


图5 (a)样品 A1 二维 OCT 断层图像;(b)样品 A2 二维 OCT 断层图像;

(c)样品 A1 纵向一线信号图;(d)样品 A2 纵向一线信号图

Fig. 5 (a) 2D OCT cross-sectional image of A1; (b) 2D OCT cross-sectional image of A2;

(c) A-scan signal of A1; (d) A-scan signal of A2

表 2 不同电工胶带样品的光程

Table 2 Optical path of different electrical tape samples

No.	Average optical path and error / μm
A1	162.96 ± 1.68
A2	288.96 ± 1.68
A3	297.36 ± 1.68
A4	286.44 ± 1.68
A5	288.12 ± 2.06
A6	
A7	201.6 ± 0
A8	177.24 ± 3.14
A9	298.2 ± 0
A10	274.68 ± 2.06

3.3 散射强度比

散射强度比是实验总结的一种区分不同品牌电

工胶带的特征参数,是样品上、下表面反射/散射强度的比值。电工胶带一般由带基和黏合剂组成,上表面的带基和空气形成一个介质突变层,下表面的黏合剂和空气也形成一个介质突变层。由于不同厂家、不同品牌的电工胶带制作工艺不同,所选用的带基和黏合剂材质也有所差异,故而折射率不同,光在这两个介质突变层的反射/散射强度也就不同。因此,散射强度比可以反映组成电工胶带的两种物质折射率差别,从而区分不同品牌的电工胶带。实验中比较了不同样品的散射强度比特征,可以发现实验结果存在差异。如图 6 所示,样品 A3 和 A4 散射强度比分别为 37.15 和 27.89,两者存在明显差异。实验采集到每种样品的散射强度比数据均值及标准差如表 3 所示。

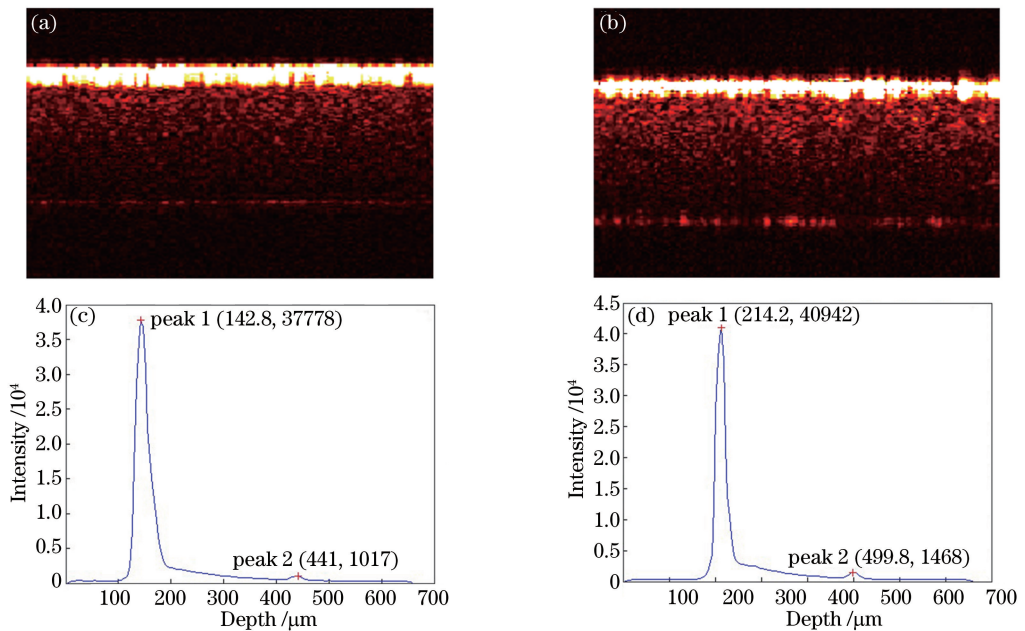


图 6 (a)样品 A3 二维 OCT 断层图像;(b)样品 A4 二维 OCT 断层图像;

(c)样品 A3 纵向一线信号图;(d)样品 A4 纵向一线信号图

Fig. 6 (a) 2D OCT cross-sectional image of A3; (b) 2D OCT cross-sectional image of A4;

(c) A-scan signal of A3; (d) A-scan signal of A4

表 3 不同电工胶带样品的散射强度比

Table 3 Comparison of the scattering intensity ratio of different electrical tape samples

No.	Average scattering intensity ratio and error
A1	6.06 ± 0.67
A2	57.82 ± 4.26
A3	41.88 ± 8.89
A4	24.06 ± 2.25
A5	14.68 ± 1.41
A6	
A7	1.62 ± 0.41
A8	8.7 ± 1.65
A9	48.32 ± 5.21
A10	16.18 ± 1.86

3.4 信号峰个数

如图 7 所示,样品 A5 可以观察到两个信号峰,而样品 A6 只能观察到一个信号峰,简单比较信号峰的个数就可以将二者区分开。出现两个峰还是一个峰取决于样品情况、系统信噪比和穿透深度。穿透深度取决于光在样品中的衰减系数,与中心波长相关。当中心波长一定时,只要信噪比大于某临界值,信号峰就不会被噪声淹没,因而可以认为观察到的信号峰数量只与样品本身有关。控制实验过程在相同的系统条件下进行。各样品信号峰个数如表 4 所示。

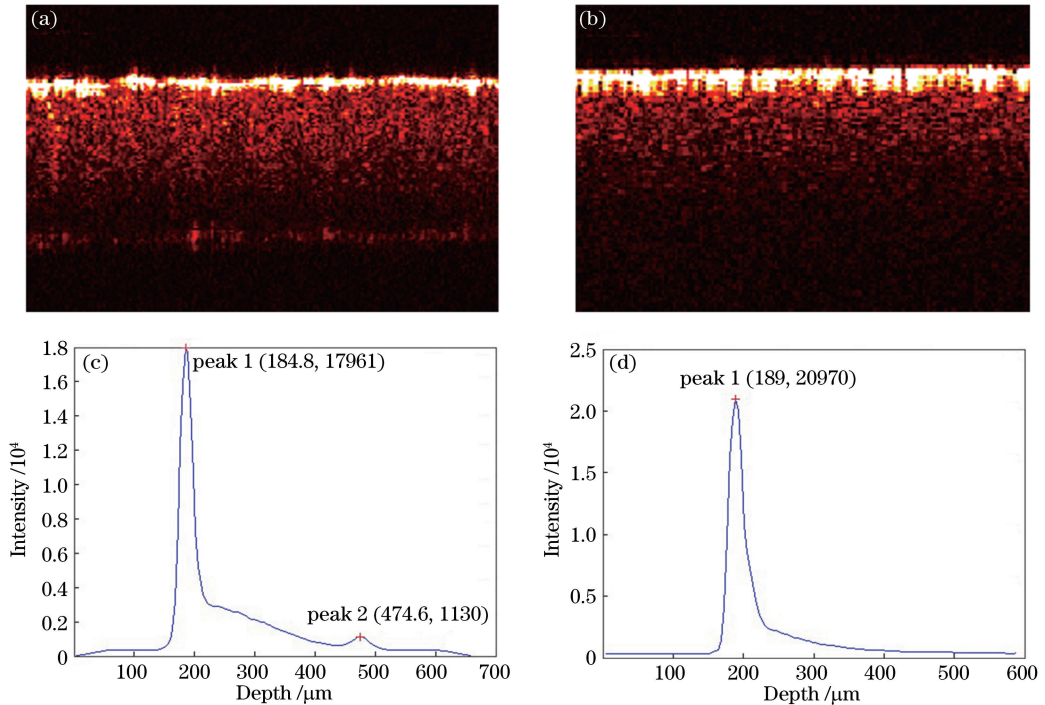


图 7 (a)样品 A5 二维 OCT 断层图像;(b)样品 A6 二维 OCT 断层图像;
(c)样品 A5 纵向一线信号图;(d)样品 A6 纵向一线信号图

Fig. 7 (a) 2D OCT cross-sectional image of A5; (b) 2D OCT cross-sectional image of A6;
(c) A-scan signal of A5; (d) A-scan signal of A6

表 4 不同电工胶带样品的信号峰个数

Table 4 Number of signal peaks of different electrical tape samples

No.	Number of signal peaks
A1	2
A2	2
A3	2
A4	2
A5	2
A6	1
A7	2
A8	2
A9	2
A10	2

3.5 衰减系数

光在穿透电工胶带内部的过程中遵从指数衰减。通过对电工胶带样品 OCT 纵向一线信号中第 1 个峰值点及其之后的 10 个数据点进行指数衰减拟合,得到衰减系数和拟合系数。拟合系数越接近 1,拟合精度越高。图 8 所示为样品 A7 和样品 A8 的指数拟合曲线图,可观察到光在电工胶带样品中呈指数形式衰减。通过指数拟合曲线图计算得到样品 A7 和样品 A8 的衰减系数分别为 84.6 和 67.2,说明样品 A7 对光的衰减更加明显。每种样品的衰减系数均值及标准差如表 5 所示。

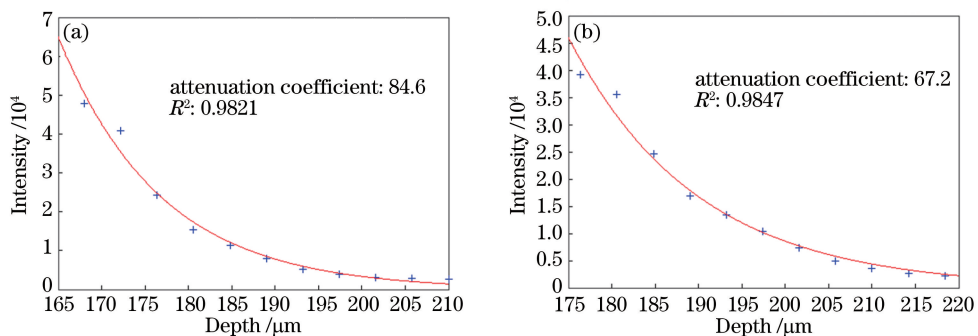


图 8 (a)样品 A7 和(b)样品 A8 第 1 个峰及之后 10 个数据点的指数拟合曲线

Fig. 8 Fitted exponential curves of peak 1 and the following 10 points for samples (a) A7 and (b) A8

表5 不同电工胶带样品的衰减系数

Table 5 Attenuation coefficients of different electrical tape samples

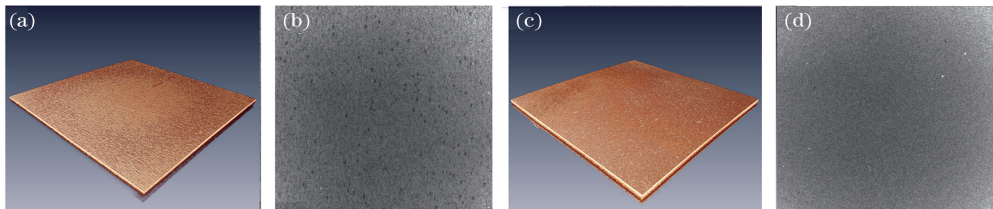
No.	Average attenuation coefficient and error
A1	11.04±1.15
A2	77.5±2.42
A3	57.86±2.05
A4	89.4±2.89
A5	67.18±2.79
A6	64.3±2.29
A7	82.86±5.79
A8	67.02±2.67
A9	64.86±5.15
A10	58.38±2.08

针对不同电工胶带样品的光程、散射强度比和衰减系数,利用 SPSS 统计软件进行独立 t 检验,分析特

表6 不同品牌样品的特征参数显著性差异($p<0.05$)比较Table 6 Comparison of the significant difference ($p<0.05$) in the characteristic parameters of different samples

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
A1									
A2	a, b, d								
A3	a, b, d	a, b, d							
A4	a, b, d	a, b, d	a, b, d						
A5	a, b, d	b, d	a, b, d	b, d					
A6	c, d	c, d	c, d	c, d	c				
A7	a, b, d	a, b	a, b, d	a, b	a, b, d	c, d			
A8	a, b, d	a, b, d	a, b, d	a, b, d	a, b	c	a, b, d		
A9	a, b, d	a, b, d	d	a, b, d	a, b	c	a, b, d	a, b	
A10	a, b, d	a, b, d	a, b	a, b, d	a, d	c, d	a, b, d	a, b, d	a, b, d

a: optical path; b: scattering intensity ratio; c: number of signal peaks; d: attenuation coefficient.

图9 (a)样品 A9 三维重建图;(b)样品 A9 深度 100 μm 处横截面图像;(c)样品 A10 三维重建图;(d)样品 A10 深度 100 μm 处横截面图像Fig. 9 (a) 3D reconstruction image of A9; (b) transverse sectional image of A9 at the depth of 100 μm ;(c) 3D reconstruction image of A10; (d) transverse sectional image of A10 at the depth of 100 μm

4 结 论

利用 OCT 技术对不同品牌的电工胶带进行检验分析,获取了电工胶带的多种新型特征参数,通过对样品进行三维重建得到其横截面图像。实验结果表明,不同品牌电工胶带的光程、散射强度比、信号峰个数、衰减系数等特征参数存在统计学显著性差异。另外,由于不同电工胶带的内部微观结构不同,其三维重建及横截面图像存在差异。通过对这些特

征参数之间是否有显著差异($p<0.05$)。表6为不同电工胶带样品特征参数的比较,可以看出,不同品牌电工胶带样品的上述特征参数具有显著性差异。

3.6 电工胶带三维 OCT 重建及横截面图像

利用 OCT 三维成像进行样品的三维立体重建,获取样品横截面图像。图9(a)和图9(c)分别为样品 A9 和 A10 的三维重建图,图9(b)和图9(d)分别是它们在约 100 μm 深度的横截面图像,图像成像范围为 4 mm×4 mm。结果发现,三维重建的横截面图像形态存在差异。对比可以看出,样品 A9 横截面图像中分布有许多黑色点状颗粒,而样品 A10 则较为均匀,这是不同品牌电工胶带制作工艺导致的。

征参数和图像的分析比较,实现了对不同品牌电工胶带的有效区分。OCT 技术的无损、原位成像优势符合法庭科学物证检验的要求,在实际工作中有望和传统的检验方法相互结合,互相补充,提高检验效率。

参 考 文 献

- [1] Liu Y. Evidence of scientific identification [M]. Beijing: Mass Press, 1998: 318.
刘耀. 物证鉴定科学[M]. 北京: 群众出版社, 1998:

- 318.
- [2] Sun Z W, Quan Y K, Tao K M. Inspection of blue electrical tapes by SEM/EDS [J]. *Forensic Science and Technology*, 2011(5): 15-18.
孙振文, 权养科, 陶克明. 蓝色电工胶带的扫描电镜/能谱法检验[J]. *刑事技术*, 2011(5): 15-18.
- [3] Sun Z W, Quan Y K, Sun Y Y. Elemental analysis of white electrical tapes by wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry [J]. *Forensic Science International*, 2013, 232: 169-172.
- [4] Mehlretter A H, Bradley M J, Wright D M. Analysis and discrimination of electrical tapes: Part I. Adhesives [J]. *Journal of Forensic Sciences*, 2011, 56(1): 82-94.
- [5] Mehlretter A H, Bradley M J, Wright D M. Analysis and discrimination of electrical tapes: Part II. Backings [J]. *Journal of Forensic Sciences*, 2011, 56(6): 1493-1504.
- [6] Huang D, Swanson E A, Lin C P, *et al.* Optical coherence tomography [J]. *Science*, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- [7] Brezinski M E. *Optical coherence tomography: Principles and applications* [M]. London: Academic Press, 2005.
- [8] Fu L, Su Y, Li G H, *et al.* Application of maximum likelihood type estimates in noninvasive blood glucose monitoring *in vivo* using optical coherence tomography [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3): 031701.
付磊, 苏亚, 李果华, 等. 广义极大似然估计在 OCT 无创血糖监测中的应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(3): 031701.
- [9] Zeng N, He Y H, Ma H, *et al.* Pearl detection with optical coherence tomography [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(8): 1140-1145.
曾楠, 何永红, 马辉, 等. 应用于珍珠检测的光学相干层析技术 [J]. *中国激光*, 2007, 34(8): 1140-1145.
- [10] Wang K, Dong J Q, Zhao H X, *et al.* The non-destructive analysis of some ancient jade artifacts unearthed from Henan province by a variety of optical techniques [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(9): 2492-2499.
王凯, 董俊卿, 赵虹霞, 等. 应用多种光学分析技术对一批河南出土古代玉器的无损分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(9): 2492-2499.
- [11] Yang S S, Zhu R, Mi L, *et al.* Application of optical coherence tomography in the detection of the mural [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0511005.
杨珊珊, 朱锐, 米磊, 等. 光学相干层析成像技术对壁画的检测研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0511005.
- [12] Yan X, Dong J Q, Li Q H, *et al.* Preliminary research in section structure characteristics of ancient glaze based on OCT technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(9): 0908001.
严鑫, 董俊卿, 李青会, 等. 基于 OCT 技术对古代瓷釉断面结构特征的初步研究 [J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0908001.
- [13] Yang S S, Mi L, Zhu R, *et al.* Non-invasive investigation of microstructure of Ding kiln porcelain with optical coherence tomography [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(2): 0208002.
杨珊珊, 米磊, 朱锐, 等. 光学相干断层成像技术在定窑瓷器检测中的应用 [J]. *中国激光*, 2016, 43(2): 0208002.
- [14] Zhang N, Wang C, Sun Z, *et al.* Characterization of automotive paint by optical coherence tomography [J]. *Forensic Science International*, 2016, 266: 239-244.
- [15] Choi W J, Min G H, Lee B H, *et al.* Counterfeit detection using characterization of safety feature on banknote with full-field optical coherence tomography [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2010, 14(4): 316-320.
- [16] Meissner S, Breithaupt R, Koch E. Fingerprint fake detection by optical coherence tomography [C]. SPIE, 2013, 8571: 85713L.