

光学相干层析成像技术对壁画的检测研究

杨珊珊^{1,2,3} 朱 锐^{1,3} 米 磊¹ 曹一挥^{1,2,3} 李青云³

¹中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

²中国科学院大学, 北京 100049

³深圳中科微光医疗器械技术有限公司, 广东 深圳 518052

摘要 光学相干层析成像(OCT)是基于迈克尔孙干涉仪,可对物体内部微观结构进行无损、非接触检测的断层成像技术。考古文物的珍贵和不可再得性要求采用无损检测技术,光学相干层析成像的无损分析特点使它适用于对壁画等文物进行大范围检测。除了可对壁画表面颜料层成像,OCT系统也可同时对其下地仗层进行断层成像,从而弥补现有技术不能对表面下内部结构进行高分辨率成像的缺点。对光学相干层析成像技术进行介绍,并针对唐墓壁画《高髻持如意仕女图》进行了成像实验,验证频域OCT对壁画颜料层和地仗层的断层成像效果。实验表明,OCT图像能够同时提供壁画表面颜料层及其下地仗层的信息,以及壁画存在的病害信息。OCT可在壁画研究及修复中提供有效信息,并成为壁画等考古工作者的有力工具。

关键词 成像系统;相干光学;无损检测;层析成像;壁画;颜料层;地仗层

中图分类号 K87;TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0511005

Application of Optical Coherence Tomography in the Detection of the Mural

Yang Shanshan^{1,2,3} Zhu Rui^{1,3} Mi Lei¹ Cao Yihui^{1,2,3} Li Qingyun³

¹*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

³*Shenzhen Vivolight Medical Device & Technology Co., Ltd, Shenzhen, Guangdong 518052, China*

Abstract Based on the Michelson interferometer, optical coherence tomography (OCT) is a fast, non-contact, coherent optical imaging technology. OCT can image the internal microstructure underneath the surface. Archaeological objects are valuable and thus require nondestructive testing techniques. OCT, as a non-destructive analysis technique, is suitable for testing any part of the mural and other cultural relics. High resolution OCT images can provide the detailed information of the paint layer on the surface and the ground layer underneath the surface, which is elusive for traditional techniques. The technique of OCT is introduced and the verification experiment of the mural of Tang dynasty is carried out. From OCT images, defect information of the paint layer on the mural topside and structure underneath the surface can be seen. The information is of great help to the research and repair of the mural. OCT can be used in the research and repair of murals as a powerful tool for the researchers.

Key words imaging systems; coherent optics; tomography; murals; nondestructive testing; paint layer; base layer

OCIS codes 110.1650; 110.2350; 110.4500; 110.6955; 170.4500

1 引言

1.1 研究背景

中国古代壁画,是绘在建筑物的墙壁或天花板上的装饰性图画,是古今中外历史上最悠久的一种绘画

收稿日期: 2015-01-23; 收到修改稿日期: 2015-02-20

基金项目: 陕西省科技统筹创新计划(2013KTCQ03-09)

作者简介: 杨珊珊(1991—),女,硕士研究生,主要从事光学相干层析成像系统方面的研究。E-mail: yangshanshan@opt.cn

导师简介: 米 磊(1979—),男,博士,副研究员,主要从事梯度折射率透镜、光学相干断层影像光学探头方面的研究。

E-mail: millay@vivo-light.com(通信联系人)

形式,它直接、间接地反映着社会历史,具有极高的艺术价值。其中唐朝壁画的素材较为丰富,除了绘画技巧的提高和题材上的发展外,还体现了中国壁画在观念法度方面模式化的形成过程与特征。

然而,由于古代壁画地理位置偏远,周围环境恶劣,经受着地震、虫害、潮湿等各种因素的自然破坏,壁画开发等人为有意无意的破坏,使现在出土的壁画面临着颜料脱落、起甲、空鼓、裂隙、褪色等诸多问题^[1]。随着时间的推移,壁画的损害会更加严重,所以对这些濒危的古代壁画的保护就显得格外紧迫^[2]。

古壁画的研究,主要是对壁画主体的干预及相关分析,调查壁画的绘制工艺及材料,同时分析产生的各种病害^[3]。传统手段大多需要从文物上取样,且只能对局部进行测试分析,效率较低,严重制约了我国古代壁画保护乃至文物事业的发展^[4]。因此,在壁画等文物研究修复中引入非介入式成像科学,显得尤为重要^[5]。

1.2 现有方法概述

针对壁画病害的检测方法,包括经验法和电磁波等技术方法。经验法主要指目测法和敲击法,目前用于壁画检测的成像科学方法主要有针对空鼓检测的超声波检测^[6]、红外热成像法^[7]和高光谱成像^[8],以及针对壁画颜料检测的高分辨电镜和拉曼光谱分析^[9]。

超声波探伤是利用材料及其缺陷的声学性能差异对超声波传播波形反射情况和穿透时间的改变来检验材料内部缺陷的无损检测方法。但其对缺陷结果的显示不直观,探伤技术难度大,且超声波检测对工作表面要求平滑,富有经验的检验人员才能准确辨别缺陷种类。红外热成像技术把壁画表面的温度差作为信息数据,以二维的热像形式检测空鼓病害的大小和分布。然而除空鼓产生的温差外,也有其他原因产生的温差,如因水的渗入造成温度降低等干扰因素导致的误判是红外检测的缺陷。高光谱成像技术依据是物体的反射光谱具有“指纹”效应,不同物不同谱,但其只能看到表面颜色信息,无法同时获得壁画颜料层下的结构信息。

1.3 光学相干断层成像技术

光学相干断层成像技术(OCT)是一种非介入、无损伤的光学成像方法^[10],目前OCT已广泛应用于眼科、心脏科、牙科等医学领域对生物组织进行无损检测^[11],并开始了在文物保护领域应用的尝试。利用OCT对壁画进行检测和断层成像,是依据样品内不同材料层上反射的光信号还原样品结构,可在获得壁画表面颜料层颜色信息的同时,获取表面下的内部结构信息,对壁画进行实时成像。

自2004年开始,OCT已开始被用于文化遗产的检查^[12]。2005年,Liang等^[13]将OCT用于博物馆壁画的研究。2013年,Targowski等^[14]将频域OCT(FD-OCT)用于达芬奇所作油画“Madonna dei Fusi”的结构检测,还原该画在以往的修复过程。2014年,严鑫等^[15]使用OCT系统对古代瓷釉端面结构特征进行了初步研究。

2 实 验

2.1 实验装置

OCT基于宽带光干涉技术,采用相干时间较短和空间相干性较高的红外光作为光源。窄红外光穿过待测物体,测量样品不同结构层的后向散射光的干涉信号,处理得到内部微观结构的层析图像^[10]。

OCT系统中,光源发出的光分为两束,作为迈克尔孙干涉仪的参考臂光束和样品臂光束,对样品臂返回光和参考臂返回光束的干涉信号进行检测。FD-OCT干涉仪的参考臂固定,而时域OCT(TD-OCT)的参考臂长度是可变的^[16]。它的优势在于能一次将返回的不同深度相干光信号同时提取,而且完全不需要深度扫描装置^[17],实现轴向扫描(A-scan),大大提高了成像速度。横向扫描(B-scan)由一系列相邻的轴向深度扫描构成,不需要移动待测物体。横向扫描和轴向扫描结合就可以得到物体的层析图像。

使用的基于光纤干涉仪的频域OCT系统如图1所示。超辐射发光二极管(SLD)光源($\lambda_0 = 830 \text{ nm}$, $\Delta\lambda \approx 58 \text{ nm}$)发出的弱相干光功率约为15 mW,经四端光纤耦合器70:30分束,分别入射到参考镜和样品组织。一路经透镜扩束投射在全反射镜上发生反射作为参考光,另一路由透镜共焦系统聚焦在样品上,成为信号光。由全反射镜反射回来的参考光与样品背向散射的信号光经光纤耦合器汇合产生干涉信号。干涉信号从耦合器另一端出射进入高速光谱仪模块,获得谱信息。经过信号解调处理,就可以得到样品不同深度散射光的强度^[18]。高速光谱解调模块由扩束镜、光栅、会聚镜和高速线阵电荷耦合器件(CCD)组成。该系统一次可对6 mm×6 mm的壁画范围进行扫描成像,成像深度达2~3 mm,横向分辨率约为20 μm ,纵向分辨率为10 μm 。

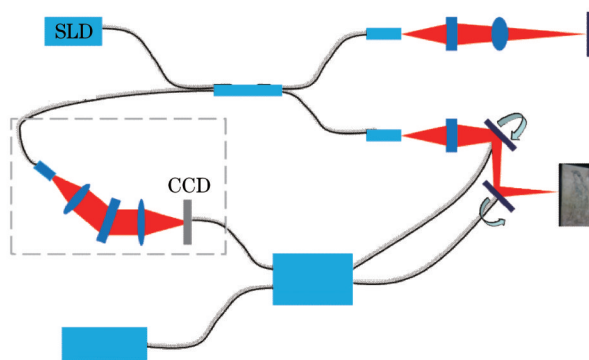


图1 光学相干层析成像系统简图

Fig.1 Schematic diagram of OCT system

2.2 实验对象

研究对象是唐朝武惠妃墓壁画——《高髻持如意仕女图》(见图2),现存于陕西省历史博物馆。武惠妃(699~737年),唐玄宗李隆基的妃子。惠妃死后,玄宗追赠她皇后之位,谥曰贞顺皇后,葬于敬陵,并立庙祭祀。

敬陵位于西安市长安区大兆乡庞留村西侧,武惠妃正处开元盛世时期,敬陵内壁画生动再现了唐朝由盛转衰时的社会生活。《高髻持如意仕女图》,高119.8 cm,宽59.8 cm,国家二级文物,画面人物为仕女,画工精湛,线条流畅,形象惟妙惟肖。其中选来做OCT检测的位置标记为红色方框。

壁画基本上都是由3个基本部分组成的,壁画的支撑结构(墙壁或岩壁)、地仗层(BL,又叫基础层、灰泥层、泥层)和颜料层(PL,或称画面层),本文主要针对颜料层和地仗层进行分析研究。



图2 唐朝武惠妃墓壁画——《高髻持如意仕女图》

Fig.2 Mural in tomb of Wu Huifei in Tang Dynasty—"A Young Lady with Updos"

2.3 实验结果

2.3.1 OCT图像对壁画结构的呈现

OCT断层图像采用灰度显示,图中浅灰色(较亮)区域对应的是探测光后向散射^[19]/反射强的位置;深灰色(较暗)区域对应的是后向散射弱的位置;完全透明的介质(壁画表面以上的空气)以及探测不到的位置对应的则是黑色。

图3所示为仕女脸颊处肤色图像及对应的OCT图像。图3(c)红线对应的OCT图像中能够观察到壁画的颜料层表面(PS)、颜料层、地仗层,以及两者之间的间隙(IN),图像底部黑色显示为非透明结构(UT),肤色脸颊处OCT图像穿透深度为1.5 mm。

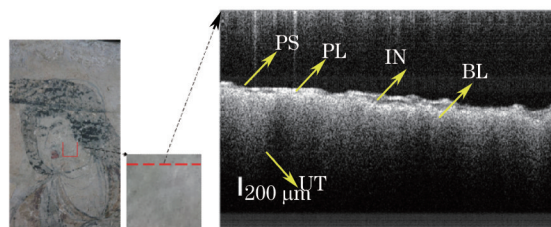


图3 脸颊处图像。(a)检测对象在原图中位置;(b)放大后效果;(c)红色虚线位置对应的OCT图像

Fig.3 Images of the cheek. (a) Target position in the mural image; (b) enlarged image; (c) OCT image

图4所示为壁画中不同颜色颜料处图像及对应的OCT图像,图4(a)~(d)分别为黑色头发、红色嘴唇、褐色袖子、蓝色裙摆处的图像及红色虚线位置对应的OCT图像。

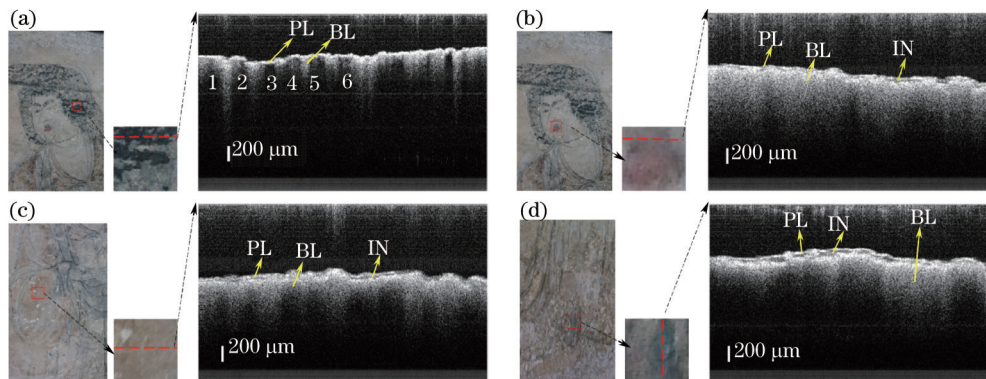


图4 不同位置的OCT图像。(a)仕女黑色头发处及其对应的OCT图像;(b)仕女红色唇部及其对应的OCT图像;

(c)仕女褐色袖子处及其对应的OCT图像;(d)仕女蓝色裙摆处及其对应的OCT图像

Fig.4 Images at different areas. (a) Image of black hair and its OCT image; (b) image of red lips and its OCT image;

(c) image of brown sleeve and its OCT image; (d) image of her blue skirt and its OCT image

图4(a)OCT图像中,可以看到颜料层和地仗层,1~6处位置的穿透深度较浅处是由于黑色颜料的存在所致。图4(b)~(d)中,除颜料层和地仗层外,还可看到两层之间的间隙。此外不同颜料对应的颜料层厚度不同,图4(a)~(d)的颜料层厚度分别为99、81、117、90 μm ;OCT图像穿透深度也不同,分别为0.1、1.3、1.1、1 mm。

OCT图像穿透深度与被测物体对光的吸收和后向散射性有关,吸收多或后向散射光弱处所对应的穿透深度较小;吸收少或后向散射光强的地方所对应的穿透深度较大。实验中,采用830 nm红外光源对不同颜色颜料处分别进行20次扫描,并对OCT图像穿透深度进行了对比分析,得到与图4一致的结论。不同颜色颜料处OCT图像穿透深度不同,由小到大依此为:黑色颜料处、蓝色颜料处、褐色颜料处、红色颜料处、肤色颜料(脸颊)处。

2.3.2 OCT图像对壁画病害的呈现

实验对象在出土后,一些自然和人为的因素导致壁画存在一些病害,如颜料脱落、起甲、裂隙等,以及表面凸起和层离现象。

图5中所示为颜料部分脱落处的壁画图像,及其对应的OCT图像。从图5(c)中可观察到颜料脱落现象:左侧只可看到残余颜料(RP)以及地仗层,但右侧仍可看到颜料层、地仗层的层状结构,最大可穿透深度为1.6 mm。图5(d)可观察到颜料起甲(DP)现象:颜料的一侧翘起脱离地仗层。图5(e)可观察到裂隙(C)现象:右侧有裂隙现象存在,裂隙凹陷的深度最大为0.8 mm;左侧颜料层表面不平滑且颜料厚度不均匀,存在颜料较厚导致的表面凸起。这些现象通过肉眼直接观察难以发现,在OCT图像中则可较为直观地展示出来。

图6所示为图3中脸颊处绿色虚线所对应的OCT图像,图6(c)中可看到颜料层和地仗层,其中左侧存在颜料层和地仗层之间的间隙较大处(GB),中间存在表面凸起处(SB),壁画表面凸起有两种可能性:地仗层的凸起和颜料层较厚的凸起,根据OCT断层图像中颜料层厚度可确定此处表面凸起是由于地仗层凸起所致。右侧颜料层存在层离现象(PD),此处层离是指颜料层存在多层亮、暗层相间的现象,是其暴露在空气中由于风化作用所形成的^[20]。

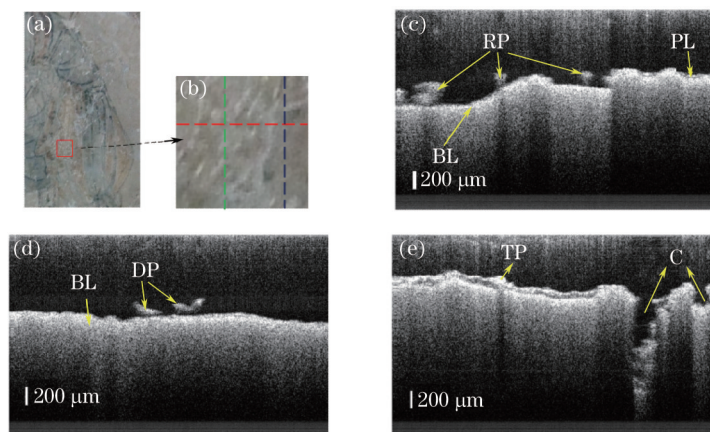


图5 颜料脱落处图像。(a) 检测对象在壁画中位置; (b)放大后图像; (c)红色虚线位置对应的OCT图像——残余颜料;
(d) 绿色虚线位置对应的OCT图像——起甲; (e) 蓝色虚线对应的OCT图像——裂隙

Fig.5 Images of paint come off. (a) Target position in the mural image; (b) enlarged image; (c) OCT image corresponding to the red dashed line—RP; (d) OCT image corresponding to the green dashed line—DP; (e) OCT image corresponding to the blue dashed line—C

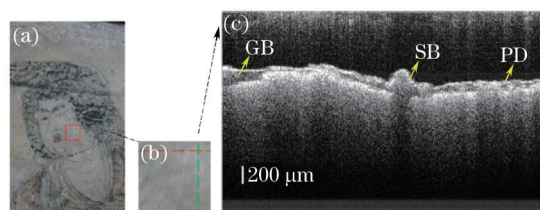


图6 脸颊处图像。(a)检测对象在原图中位置; (b)放大后效果; (c)绿色虚线位置对应的OCT图像

Fig.6 Images of the cheek. (a) Target position in the mural image; (b) enlarged image; (c) OCT image corresponding to the green dashed line

2.3.3 OCT 图像检测壁画修补效果

图7所示为对壁画严重脱落处进行的修补后的图像及其对应的OCT图像。图7(c)中可看到修补处表面基本平滑,修补材料的材质均匀,但也存在表面凹陷(SD)的情况。

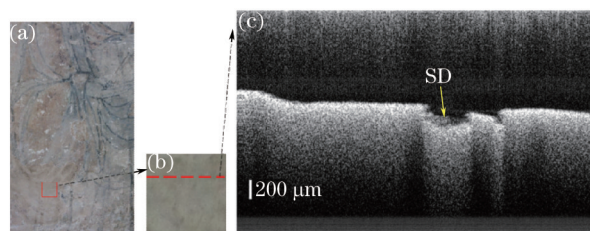


图7 新补涂料处图像。(a)检测对象在原图中的位置; (b)放大后效果; (c)红色虚线位置对应的OCT图像

Fig.7 Images of new paint. (a) Target position in the mural image; (b) enlarged image; (c) OCT image corresponding to the red dashed line

3 结 论

在OCT图像中,不同位置的穿透深度与颜料颜色、表面病害等有关,可以根据颜料层和地仗层之间的空隙清晰分辨出壁画的层状结构,并对颜料层厚度、平滑程度进行评估。而且通过OCT图像分析了解了壁画存在起甲、颜料脱落、裂隙、表面凸起等病害。此外,还可借助OCT分析壁画修补的效果,检查表面平滑程度。上述信息均是在对壁画进行无损检测基础上获得的,研究结果显示,将OCT应用于壁画检测,可以弥补目前壁画表面信息和内部结构信息不能有效兼得的问题。

参 考 文 献

1 Zhao Linyi, Wang Wanfu, Ma Zanfeng, *et al.*. The cause of diseases of the murals in norbulingka and the prevention and cure of them [J]. China Tibetology, 2009, (3): 54-60.

- 赵林毅,汪万福,马赞峰,等. 西藏罗布林卡壁画病害成因及其防治对策[J]. 中国藏学, 2009, (3): 54-60.
- 2 Wang Kai. Virtual Restoration Method of Cracks in Mural[D]. Xi'an University of Architecture and Technology, 2013: 9-15.
王 凯. 古壁画裂缝虚拟修复技术研究[D]. 西安建筑科技大学, 2013: 9-15
- 3 Qunxi Zhang. Imaging science and the conservation of tang tomb paintings[C]. Application of Imaging and Analytical Science to the Interdisciplinary Study of Wall paintings along the Silk Road, 2010.
- 4 Liu Jianming. Intelligent Image Processing and Inpainting for Ancient Fresco Preservation[D]. Zhejiang University, 2010: 13-23.
刘建明. 古代壁画图像保护与智能修复技术研究[D]. 浙江大学, 2010: 13-23.
- 5 Haida Liang. Imaging science for archaeology and art conservation[C]. Application of Imaging and Analytical Science to the Interdisciplinary Study of Wall paintings along the Silk Road, 2010.
- 6 Sun Bing, Gu Chengquan, Fang Yun, *et al.*. Application of acoustic detection in confirming the detachment area of mud plasters[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2004, 1(6): 489-493.
孙 兵, 顾成权, 方 云, 等. 应用超声波检测地杖层空腔区域[J]. 工程地球物理报, 2004, 1(6): 489-493.
- 7 Zhang Rongcheng. The research on IR thermography diagnostic method for wall fresco in hollow detection[C]. The 11th National symposium on the Nondestructive testing Technology in Civil Engineering, 2013: 56-72
张荣成. 壁画空鼓缺陷的红外线检测技术研究[C]. 第十一届全国建设工程无损检测技术学术会议论文集, 2013: 56-72.
- 8 Du Shusong, Wang Yongmei, Tao Ran. Multiple beam interferential spectral imaging technology[J]. Acta Optica Sinica. 2013, 33(8): 0803003.
杜述松, 王咏梅, 陶 然. 多光束干涉光谱成像技术[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0803003.
- 9 An Yan, Liu Ying, Sun Qiang, *et al.*. Design and development of optical system for portable raman spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(03): 0330001.
安 岩, 刘 英, 孙 强, 等. 便携式拉曼光谱仪的光学系统设计与研制[J]. 光学学报, 2013, 33(03): 0330001.
- 10 Drexler W, Fujimoto J G. Optical Coherence Tomography: Technology and Applications[M]. Berlin: Springer, 2008: 9-15, 1-19.
- 11 Shi Boya, Meng Zhuo, Liu Tiegen, *et al.*. Non-distorted depth of optical coherence tomography system in human dental tissues[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(02): 0217001.
石博雅, 孟 卓, 刘铁根, 等. OCT系统对人体牙齿组织的非失真成像深度的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(02): 0217001.
- 12 P Targowski, M Iwanicka. Optical coherence tomography: its role in the non-invasive structural examination and conservation of cultural heritage objects—a review[J]. Applied Physics A, 2012, 106(2): 265-277.
- 13 Haida Liang, Marta Gomez Cid, R G Culu, *et al.*. En-face optical coherence tomography—a novel application of non-invasive imaging to art conservation. Opt Express, 2005, 13(16): 6133-6144.
- 14 P Targowski, M Iwanicka, Ewa A Kaszewska, *et al.*. OCT structural examination of Madonna dei Fusi by Leonardo da Vinci[C]. SPIE, 2013, 8790: 87900N.
- 15 Yan Xin, Dong Junqing Li Qinghui, *et al.*. Preliminary research in section structure characteristics of ancient glaze based on OCT technology[J]. Chinese J 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.
- 16 T J Eom, Y C Ahn, C S Kim, *et al.*. Calibration and characterization protocol for spectral-domain optical coherence tomography using fiber Bragg gratings[J]. J Biomed Opt, 2011, 16(3): 030501.
- 17 Duan Lian, He Yonghong, Zhu Rui, *et al.*. Development of a spectrum domain 3D optical coherence tomography system[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(10): 2528-2533.
段 炼, 何永红, 朱 锐, 等. 三维谱域光学相干层析成像系统的研制[J]. 中国激光, 2009, 36(10): 2528-2533.
- 18 Zeng Nan, He Yonghong, Ma Hui, *et al.*. Pearl detection with optical coherence tomography[J]. Chinese J 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.
- 19 Guo Xin, Wang Xiangzhao, Bu Peng, *et al.*. Effects of scattering on spectral shape and depth resolution in Fourier domain optical coherence tomography[J]. Chinese J Lasers, 2014, 34(1): 0117001.
郭 昕, 王向朝, 步 鹏, 等. 样品散射对频域光学相干层析成像光谱形状和深度分辨率的影响[J]. 中国激光, 2014, 34(1): 0117001.
- 20 Haida Liang, Margaret Sax, David Saunders, *et al.*. Optical coherence tomography for the non-invasive investigation of the microstructure of ancient Egyptian faience[J]. Journal of Archaeological Science, 2012, 39(12): 3683-3690.

栏目编辑: 张 雁