

光学相干断层成像技术在定窑瓷器检测中的应用

杨珊珊^{1,2} 米磊¹ 朱锐^{1,2*} 刘海平²

¹中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 光学相干断层成像(OCT)是基于低相干光干涉仪,可对物体进行断层成像的技术。OCT系统的无损检测和图像高速采集特征使其适于对历史文物进行成像检测,并提供文物表面下的结构信息。对OCT技术原理进行了阐述,并采用OCT系统对来自北宋的定窑瓷器进行无损检测及断层图像的采集。通过定窑瓷器的OCT断层图像,可观察到定窑瓷器表层釉质和胎体层,层状结构以及不同结构的界面也清晰可见。通过对OCT断层图像的分析,可获知瓷器表面的施釉情况及釉层特点,釉层和胎体的风化特征及其中气泡及晶体颗粒的分布、OCT图像对瓷器的穿透深度等信息。同时可分析釉层和胎体表面工艺以及二次修补的信息。

关键词 成像系统; 光学相干断层成像; 瓷器; 釉层; 胎体

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0208002

Non-Invasive Investigation of the Microstructure of the Ding Kiln Porcelain with Optical Coherence Tomography

Yang Shanshan^{1,2} Mi Lei¹ Zhu Rui^{1,2} Liu Haiping²

¹State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

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

Abstract Optical coherence tomography (OCT) is a non-destructive subsurface tomography system based on low coherence interferometry. Non-invasive nature and high speed of acquisition of OCT make it possible to image relic and provide subsurface morphology visualization. Porcelain from Ding kiln of Northern Song dynasty is scanned and imaged to visualize the subsurface morphology of the surface glaze and core. Layer structures and interfaces can be visualized clearly from OCT images. The characteristics of the thickness of the glaze layer, bubbles and crystal particles in glaze, the penetration depth of OCT in porcelain are analyzed.

Key words imaging systems; optical coherence tomography; porcelain; core; glaze

OCIS codes 110.4500; 110.2350; 110.1650; 110.6955

1 引 言

瓷器是中国宝贵的历史文物,具有重要的艺术价值、历史价值和收藏价值。文物的检测需要科学的评估和分析方法,以便对其进行无损的检测研究及保护。通过对文物的检测和分析,进而获取文物所处年代的社会生活方式和生产水平等信息^[1]。为检测文物的结构、组成及其存在的问题,相关研究人员不断追求并探索非接触、非侵入性的检测方法^[2]。

文物保护相关研究单位采用多种方法获取文物的结构、组成等信息,主要包括经验法和科学法。其中

收稿日期: 2015-07-27; 收到修改稿日期: 2015-10-20

基金项目: 国家重点科技支撑项目(2015BAI01B06)、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,主要从事内窥式光学相干断层成像系统等方面的研究。

E-mail: millay@126.com

*通信联系人。E-mail: rzhu@vivo-light.com

基于电磁学的科学研究方法能够为研究人员提供可靠的结构特征信息。近年来,X射线成像^[3]、近红外成像^[4-5]、共聚焦显微镜成像^[6-7]和紫外荧光成像^[8-9]等技术不断被尝试应用在文物的检测和分析中^[10]。

X射线成像具有无损检测及图像直观的优点,但X射线会使物体的热发光性质发生改变。X射线成像只能提供二维图像,将文物的立体信息显示在一张平面图中,不利于对文物结构信息的识别^[11]。红外成像和红外电视也用于历史文物和艺术品的检测识别中。纽约州立大学布法罗大学采用红外成像技术对帆布油画进行成像检测,从图像中可得到表面下信息、作品创作中的涂改以及表面涂料层的缺陷和修补等信息。在红外电视中,将三维信息显示在二维图像中,表面下的结构信息不能够得到充分显示^[12]。共聚焦显微成像的分辨率较高,但穿透深度较小^[13-14],这是由于共聚焦显微成像中的纵向分辨率和横向分辨率均取决于成像系统的数值孔径。

光学相干断层成像(OCT)技术是采用近红外光光源^[15]检测物体后向散射信号进行无损检测及成像的技术。OCT能够对检测目标的微观结构进行实时断层成像,提供二维或三维图像,且分辨率达微米量级,成像深度范围达到2~3 mm。近年来,OCT已开始应用于历史文物和考古研究中,进行无损检测和成像,提供结构组成的信息^[16]。

2008年,Yang等^[17]采用OCT对来自宋代和元代的瓷器进行扫描成像,并观察瓷器表面下形态结构。他们对瓷器中存在的气泡、晶体颗粒进行分析,并根据相位分布对瓷器进行分类。2012年,Liang等^[18]对古埃及彩陶和玻璃珠复制品进行OCT成像检测分析以及电子扫描显微镜的成像。他们发现可通过OCT断层图像中的表面釉层和釉层与胎体界面的形态特征来对彩陶进行分类。Yang等^[19-20]在2012年利用OCT对中国宋代瓷器进行成像检测,并对釉层厚度,气泡位置和大小,釉层和胎体界面特征进行分析。

本文利用OCT系统对北宋定窑瓷器进行扫描成像,并通过OCT图像分析定窑瓷器的特征。对定窑瓷器釉层和胎体的结构、厚度等信息进行分析。根据OCT图像中釉层特点,可推断瓷器制作的施釉技术及其生产年代。

2 光学相干断层成像系统

如图1所示,这里采用的OCT系统基于光纤和频域OCT(FD-OCT)技术。其中,干涉仪是基于光纤的低相干干涉仪,耦合器分光比为30:70(为了得到较强的参考臂)。低相干光源采用超辐射发光二极管(SLD),经过2×2的耦合器后分别进入到参考臂和样品臂。进入参考臂的光经过平面镜反射后成为参考光信号,进入样品臂的光束经聚焦透镜后到达样品,其后向散射光信号为样品光信号。参考光信号与样品光信号经过耦合器后发生干涉,干涉信号到达光谱解调装置。在光谱解调装置中,干涉信号经过光栅色散后,由线阵CCD(e2v,2048 pixel,28 kHz)进行信号采集。物体不同深度的后向散射光信息包含在光谱信息中,处理后得到纵向深度信号A-line。利用X方向的扫描振镜(扫描频率为25 kHz),进行横向扫描可得到一幅OCT图像B-scan^[21]。

实验中采用的是高分辨率频域OCT系统,利用光谱解调装置采集干涉信号。对高斯光束而言,轴向分辨率^[22]由相干长度决定

$$\Delta z = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda}, \quad (1)$$

式中 Δz 是自相干函数的半峰全宽, $\Delta \lambda$ 是光功率谱半峰全宽, λ 是光源的中心波长。OCT图像的横向分辨率取决于光束聚焦的衍射光斑极限。衍射光斑极限与数值孔径和光束发散角成反比 $[NA = d/(2f)]$ 。横向分辨率可表示为

$$\Delta x = \frac{4\lambda}{\pi} \left(\frac{f}{d} \right), \quad (2)$$

式中 f 是透镜焦距, d 是物镜会聚后的光斑直径。横向分辨率^[23]与轴向可视范围 b 和共焦参数 z_R ($b = 2z_R$)相关,等于瑞利范围的2倍:

$$b = 2z_R = \frac{\pi \cdot \Delta x^2}{\lambda}. \quad (3)$$

因此,提高横向分辨率会导致轴向可视范围的减小,与共焦显微镜面临着同样的问题。在OCT成像中,

一般选择较小的数值孔径,使轴向可视范围较大,能够对物体更深处进行成像。探测深度 Z_{\max} 与光谱仪的光谱分辨率相关

$$Z_{\max} = \frac{\lambda^2}{4\delta\lambda}, \quad (4)$$

式中 $\delta\lambda$ 是光谱仪的光谱分辨率^[24]。

实验中 OCT 系统采用的 SLD 光源(Inphenix, 830 nm SLD)中心波长为 830 nm,带宽为 43 nm。利用马赫-曾德尔干涉仪(MZI),测量不同光程差的干涉信号,光程差增加间隔为 400 μm ,信号强度随光程差的增大会逐渐衰减,灵敏度在 100 dB~105 dB 区间内。同时通过测量一条 A-line(选择 depth 为 1.5 mm 处)的半峰全宽值,即可得到其轴向分辨率为 $\Delta x = 13.4 \mu\text{m}$,如图 2 中所示。通过测量样品臂的光照射到物体上光斑尺寸得到横向分辨率 ($1/d^2$) 为 14.2 μm 。每条 A-line 中包含 470 个有效像素点,每幅 B-scan 图像中包含 980 条 A-line。经过光谱仪后采集到的信号光谱仪 $I(\lambda)$ 是波长 λ 的函数,需要转换到波数 k 的函数。经过重采样和快速傅里叶变换,可得到样品不同深度的信息。二维断层图像(B-scan)的采集周期为 32 ms。系统采用标准视频摄像机来精确定位并记录 OCT 的成像位置,摄像机通过 USB 接口与计算机主机连接。

光源发出的光经过 2x2 耦合器分成两束:参考臂光束和样品臂光束。参考光信号和样品光信号经耦合器干涉后进入光谱仪。OCT 系统中,光谱仪中的线阵 CCD(e2v, 2048 pixel, 28 kHz)用来采集光谱信号。通过 X 方向振镜的一维扫描可生成 B-scan 二维断层图像。

OCT 断层图像经过对数变换的处理,采用灰度图像进行显示。图像中较亮的区域表明该出物质的后向散射光信号较强;较暗区域表明其后向散射光信号较弱。完全透明的介质(如釉层表面上的空气)以及探测深度可及范围外显示为黑色。物体结构的折射率差异和改变处的后向散射光信号会增强,从而在 OCT 图像中表现为较亮界面或斑点^[25]。

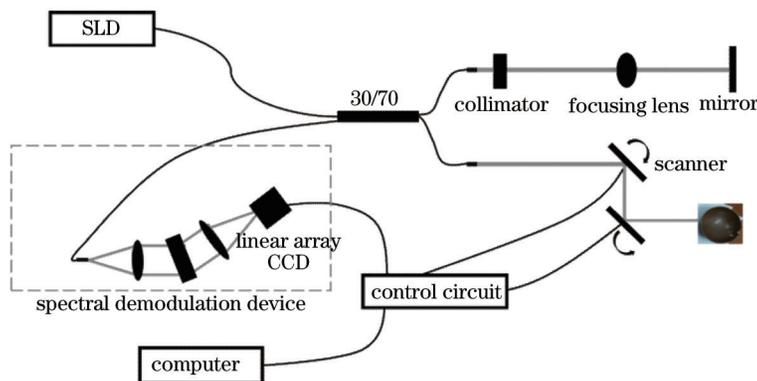


图 1 基于光纤干涉仪的 OCT 系统简图

Fig.1 Schematic of OCT system based on a fiber optical interferometer

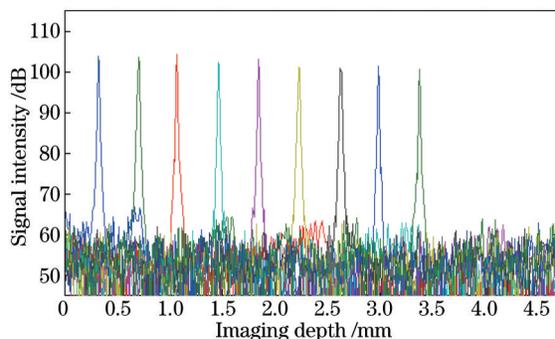


图 2 马赫-曾德尔干涉仪测量的信号强度随深度的变化

Fig.2 Signal intensity versus depth measured by MZI

3 检测对象—北宋定窑瓷器

这里利用 OCT 系统对北宋定窑瓷器进行成像检测和图像分析。中国是瓷器的故乡,瓷器是汉民族文化

的重要组成部分。在中国,陶瓷艺术可追溯至 2500 到 4500 年前。一般而言,陶瓷可分为陶和瓷两类,其中瓷器较为高级,是一种由瓷石、高岭土等组成,经混炼、成形、煅烧而成的外表施有釉或彩绘的器物。一个时代的陶瓷制作技术和特征可以反映当时人们对美的追求和塑造。人们使用和收藏的器物,则表明了生活的精致富足以及奢华程度。这里选择出土自陕西蓝田的北宋定窑瓷器进行检测和分析,对定窑瓷器的检测分析具有重要的考古价值和历史价值。作为墓主生前使用和收藏的器物,它们表明了北宋士大夫们精致富足但不奢华的生活习惯。

如图 3 所示,这里检测的历史文物——北宋定窑瓷器包括:白瓷碎片,瓷壶碎片,定窑瓷碗,红酱釉展。

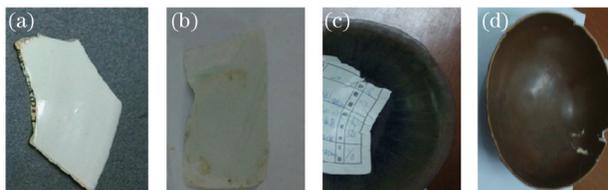


图 3 北宋定窑瓷器。(a) 白瓷碎片; (b) 瓷壶碎片; (c) 瓷碗; (d) 红酱釉展

Fig.3 (a) Ding kiln white-glaze porcelain fragment in the Northern Song Dynasty; (b) porcelain pot fragment; (c) Ding kiln porcelain bowl; (d)reddish brown bowl

4 实 验

定窑瓷器的表层与空气的界面处介质存在光散射系数和光吸收系数的变化,在 OCT 图像中显示为一条亮线。釉层和瓷器胎体之间也存在光散射系数和光吸收系数的变化,相比于前者,此处的变化较小,其在 OCT 图像中显示为一条亮带。

图 3(a)北宋定窑白瓷碎片及其 OCT 图像如图 4 所示。定窑白瓷的釉层较薄,釉色为奶白色。在北宋早期,瓷器的边缘部分是施釉的,这点与北宋晚期生产的瓷器不同。在图 4(b)中,不同层状结构清晰可见:釉层与空气界面(IGA),釉层(GL),釉层与胎体界面(IGC),以及胎体层(CL)。釉层与空气界面(IGA)在图像中显示为一条亮线,釉层(GL)显示为较暗颜色,表明釉层均匀、透明的性质。釉层厚度为 $200\ \mu\text{m}$, OCT 图像对瓷器的最大穿透深度为 $1.6\ \text{mm}$ (在空气中对应为 $2\sim 3\ \text{mm}$), OCT 可检测到的胎体层厚度为 $1.4\ \text{mm}$ 。OCT 图像底部颜色较暗处表示该处的后向散射光信号较弱,主要由瓷器近表面部分对光的衰减导致到达深处的光较弱。白瓷碎片背面的 OCT 图像如图 4(c)所示,同样存在类似图 4(b)中的层状结构。与正面的 OCT 图像不同,背面釉层较薄,厚度为 $120\ \mu\text{m}$ 。

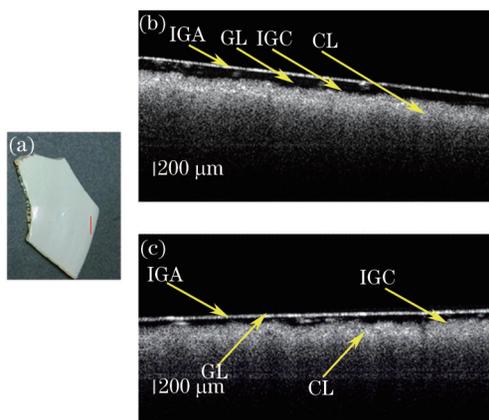


图 4 (a) 白瓷碎片; (b) 白瓷碎片的 OCT 断层图像(沿红线扫描); (c) 白瓷碎片背面的 OCT 断层图像

Fig.4 (a) Ding kiln white-glaze porcelain fragment in Northern Song Dynasty; (b) OCT image of virtual cross-section across the glazed porcelain fragment (scan along the red line); (c) OCT image of the back of the porcelain fragment

北宋定窑瓷器的釉层中会出现气泡(B)和晶体颗粒(CP)。在 OCT 图像中,由于折射率特性的变化,釉层中的气泡(B)显示为较亮的短线,晶体颗粒(CP)显示为较量的团状物。北宋定窑瓷壶碎片不同位置的 OCT 断层图像如图 5 所示。图 5(b)是完好无损处的 OCT 断层图像,层状结构及界面清晰可见。表面亮线表示釉层

的存在,其厚度为 $500\ \mu\text{m}$ 。在釉层中存在一些亮斑,由晶体颗粒和釉层的折射率变化导致。OCT 图像的穿透深度为 $1.3\ \text{mm}$,检测到的胎体层厚度为 $750\ \mu\text{m}$ 。釉层和胎体的界面显示为一条亮带,而不是一条亮线。这是因为釉层和胎体之间的折射率变化是渐变的,与釉层和空气界面的突变不同。伪影是系统噪声(NS),由光路中的干涉所致。

在图 5(c)中,突起部分与两侧不同,不存在釉层,是二次修补处(SR)。釉层中的短亮线由釉层中存在的气泡引起。OCT 图像中,与其他位置相比,二次修补处穿透深度较浅,为 $700\ \mu\text{m}$ 。在图 5(d)中,釉层下存在着胎体层的突起现象,表明胎体层表面不平滑(USC)以及釉层厚度的不均匀。

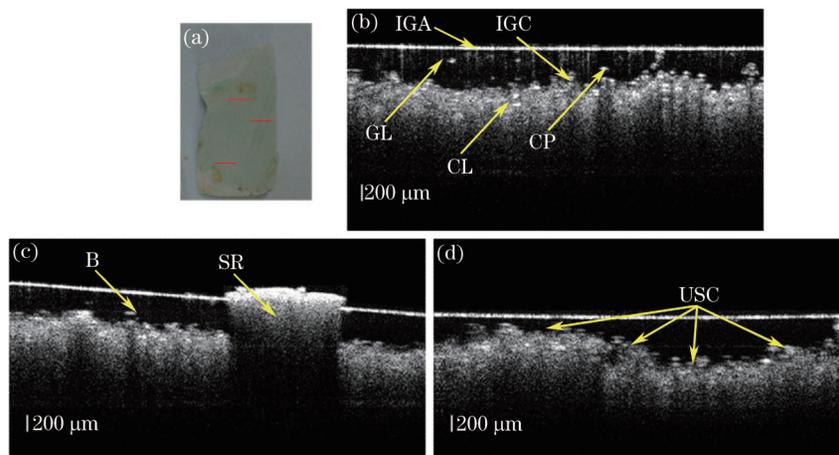


图 5 (a) 瓷壶碎片; (b) 瓷壶碎片完好无损处的 OCT 断层图像(沿上面一条线扫描得到); (c) 瓷壶碎片二次修补处的 OCT 断层图像(沿中间一条线扫描得到); (d) 胎体层表面不均匀的 OCT 断层图像(沿下面一条线扫描得到)

Fig.5 (a) Ding kiln white-glaze porcelain pot fragment in the Northern Song Dynasty; (b) OCT image of the undamaged position of the porcelain pot fragment (scan along the top line); (c) OCT image of the secondary repair position of the porcelain pot fragment (scan along the middle line); (d) OCT image showing the uneven surface of porcelain under the glaze layer (scan along the bottom line)

图 6 所示为北宋定窑瓷碗及其 OCT 图像。在图 6(b)OCT 图像中,可清晰观察到层状结构特征。表面釉层的厚度为 $400\ \mu\text{m}$,釉层中存在风化特征(WFG),表现为多层亮界面的叠加。类似地,胎体的风化特征(WFC)亦可在图 6(c)中观察到。图 6(c)是瓷碗外部的 OCT 断层图像,釉层厚度为 $600\ \mu\text{m}$,OCT 图像的穿透深度为 $1.1\ \text{mm}$ 。

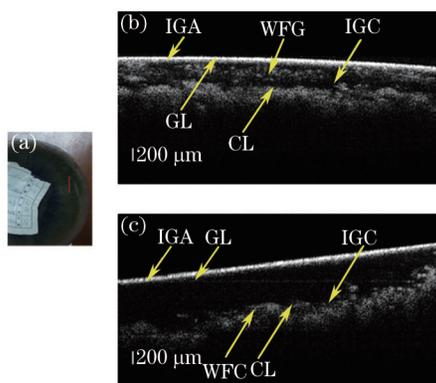


图 6 (a) 瓷碗; (b) 瓷碗内部的 OCT 断层图像(沿着红线扫描); (c) 瓷碗外部的 OCT 断层图像

Fig.6 (a) Ding kiln porcelain bowl in the Northern Song Dynasty; (b) OCT image inside of the porcelain bowl (scan along the bottom line); (c) OCT image outside of the porcelain bowl

图 7 所示为红酱釉展及其 OCT 断层图像。图 7(b)是红酱釉展内部的 OCT 断层图像,表面平滑但不存在釉层,穿透深度为 $500\sim 900\ \mu\text{m}$ 。图 7(c)是在红酱釉展外部采集的 OCT 断层图像,表面存在厚度为 $80\sim 150\ \mu\text{m}$ 的釉层,OCT 图像的穿透深度为 $1.1\ \text{mm}$ 。图 7(c)胎体层可以观察到风化特征,其表面较薄的釉层表明了施釉技术的精湛,由此可推断出该红酱釉展生产于技术较成熟的北宋后期。

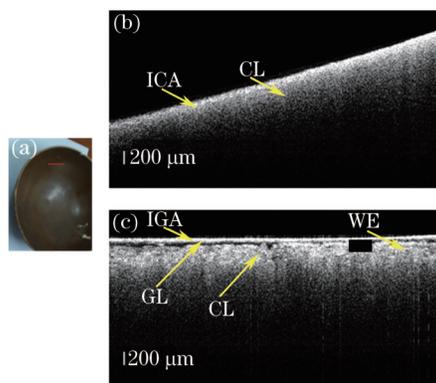


图7 (a) 红酱釉展; (b) 红酱釉展内部的OCT断层图像(沿红线扫描得到); (c) 红酱釉展外部的OCT断层图像

Fig.7 (a) Reddish brown bowl in the Northern Song Dynasty; (b) OCT image inside the reddish brown bowl (scan along the bottom line); (c) OCT image outside the reddish brown bowl

5 结 论

上述实验中分别对四种不同的定窑瓷器进行了检测和OCT断层图像的分析,并从OCT图像中得到瓷器的层状结构信息。由于介质的光散射系数和光吸收系数的差异和变化,不同介质的界面处表现为一条亮线(如釉层和空气界面,IGA)或一条亮带(如釉层和胎体界面,IGC)。OCT图像的穿透深度取决于瓷器材质对光的散射和吸收强弱。较弱的后向散射和较强的吸收特性返回光信号较弱,OCT图像穿透深度较浅。

从OCT图像中可分辨出釉层内的气泡以及晶体颗粒,其中气泡表现为一条短亮线[如图5(b)],晶体颗粒则表现为较亮的白斑[如图5(c)]。根据釉层中晶体颗粒、气泡等杂质的存在(如图5所示),可知该瓷器的施釉技术较差些,推断其生产于较早期。通过釉层的厚度特征,可以推断施釉技术,较薄的釉层表明施釉技术较精湛[如图7(c)中所示],可推断其生产于施釉技术较发达的北宋后期。从釉层表面的均匀性以及界面处的平滑性,可以了解到胎体表面特征[如图5(d)]和二次修补处的存在[如图5(e)],从而发现制造过程中存在的问题和缺陷。多重亮界面的风化特征也可在OCT图像中观察到,可能存在于釉层[如图6(c)]和胎体层[如图6(d)],表明瓷器在制作和保存过程中的环境湿度较大。根据OCT图像分析可知,该技术可辅助考古研究人员进行文物的研究。

作为近年来新引入到文物检测中的新技术,凭借其非侵入性和非接触性的检测特征,OCT表现出较大的潜力和可能性来检测文物的内部层状结构及信息。这里的实验表明OCT可以用来准确辨别瓷器内部釉层和瓷质的不同结构及厚度等特征。研究人员可从OCT断层图像中获取瓷器微观结构、二次修补以及内部缺陷等信息。而且,OCT能够对尺寸较大的瓷器进行无损成像检测。通过进一步的成像和实验,OCT能够在考古文物的研究中起到重要作用。随着OCT技术的不断改进和提高,作为无损检测技术之一的OCT将会在文物保护研究领域中得到更广泛的应用,辅助相关研究人员对文物进行更精确的分析和研究,并采取合适的保护措施。

致谢 感谢提供检测样品的考古专家,感谢李嘉男博士、李青云和吕杰杰工程师在实验过程和论文写作中提供的帮助。

参 考 文 献

- H Liang, M Cid, R Cucu, *et al.*. En-face optical coherence tomography—a novel application of non-invasive imaging to art conservation [J]. *Opt Express*, 2005, 13(16): 6133–6144.
- Defang J, Paijun D, Yuzhi K, *et al.*. Holographic non-destructive testing for cultural relics[C]. *SPIE*, 1983, 370: 259–265.
- Schreiner M, Frühmann B, Jembrih-Simburger D, *et al.*. X-rays in art and archaeology: an overview[J]. *Powder Diffraction*, 2004, 19(1): 3–11.
- Verhoeven G. Imaging the invisible using modified digital still cameras for straightforward and low-cost archaeological near-infrared

- photography[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2008, 35(12): 3087–3100.
- 5 Verhoeven G J, Smet P F, Poelman D, *et al.*. Spectral characterization of a digital still camera's NIR modification to enhance archaeological observation[J]. *IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(10): 3456–3468.
- 6 Evans A A, Donahue R E. Laser scanning confocal microscopy: a potential technique for the study of lithic microwear[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2008, 35(8): 2223–2230.
- 7 Dermdarsky M, Ocklind G. Some preliminary observations on subsurface damage on experimental and archaeological quartz tools using CLSM and dye[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2001, 28(11): 1149–1158.
- 8 Hunt C O, Rushworth G, Dykes A P. UV–fluorescence microscopy and the coherence of pollen assemblages in environmental archaeology and Quaternary geology[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2007, 34(4): 562–571.
- 9 Creagh D C, Bradley D A. *Radiation in Art and Archeometry*[M]. Amsterdam: Elsevier, 2000.
- 10 Yang Shanshan, Zhu Rui, Mi Lei, *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.
- 11 David A Scott. *Copper and Bronze in Art: Corrosion, Colorants, Conservation*[M]. Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 2002: 392–394.
- 12 Wang Mian, Xi Sancai. Infrared TV and its application in the detection of cultural relics[J]. *Southeast Culture*, 1993, (6): 117–118.
 王 勉, 奚三彩. 红外电视及其在文物检测中的应用[J]. *东南文化*, 1993, (6): 117–118.
- 13 Drexler Wolfgang, Fujimoto James G. *Optical Coherence Tomography*[M]. Berlin: Springer, 2008.
- 14 M Rajadhyaksha, R Anderson, R H Webb. Video–rate confocal scanning laser microscope for imaging human tissues in vivo[J]. *Appl Opt*, 1999, 38(10): 2105–2115.
- 15 D Huang, E A Swanson, C P Lin, *et al.*. Optical coherence tomography[J]. *Science*, 1991, 254(5035): 1178–1181.
- 16 M L Yang, C W Lu, I J Hsu, *et al.*. The use of optical coherence tomography for monitoring the subsurface morphologies of archaic jades [J]. *Archaeometry*, 2004, 46(2): 171–182.
- 17 Yang M L, Winkler A M, Barton J K, *et al.*. Using optical coherence tomography to examine the subsurface morphology of Chinese glazes [J]. *Archaeometry*, 2009, 51(5): 808–821.
- 18 H Liang, M Sax, D 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.
- 19 Yang M L, Winkler A M, Klein J, *et al.*. Using optical coherence tomography to characterize thick–glaze structure: Chinese Southern Song Guan glaze case study[J]. *Studies in Conservation*, 2012, 57(2): 67–75.
- 20 Yang M L, Katz J I, Barton J, *et al.*. Using optical coherence tomography to examine additives in Chinese Song Jun Glaze[J]. *Archaeometry*, 2015, 57(5): 837–855.
- 21 Greenbaum Elias, Drexler Wolfgang, Fujimoto James G. *Optical Coherence Tomography: Technology and Applications*[M]. Berlin: Springer, 2008.
- 22 Guo Xin, Wang Xiangzhao, Nan Nan, *et al.*. A depth resolution enhancement technique in Fourier domain optical coherence tomography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0311002.
 郭 昕, 王向朝, 南 楠, 等. 一种频域光学相干层析成像深度分辨率增强技术[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0311002.
- 23 Zhu Yue, Gao Wanrong, Guo Yingcheng. A method of improving imaging quality of full–field optical coherence tomography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0517001.
 朱 越, 高万荣, 郭英呈. 提高全场光学相干层析系统成像质量的方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0517001.
- 24 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.
- 25 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.

栏目编辑: 何卓铭