

文章编号 1004-924X(2008)07-1335-08

# 用于玉石结构分析的光学相干层析技术

曾楠, 何永红, 马辉

(清华大学深圳研究生院 光学检测实验室, 深圳 518055)

**摘要:**描述了光学相干层析方法在玉石检测中的应用。利用中心波长 1 310 nm 的宽带光源和傅里叶域光学延迟线实现了扫描速度 1 frame/s、纵向分辨率 15  $\mu\text{m}$ 、成像深度 3 mm 的光学相干层析成像系统。通过实验现象和物理解释阐述了光学相干层析图像信息与玉石结构特征的对应关系,并根据翡翠样品在层析成像中光学散射特性随深度变化的梯度和在二维被测切面内的强弱分布,提出了评估翡翠透明度和净度特性的光学方法,指出 OCT 图像特征亦可直观显示古玉钙化沁色部分的光学特性差异。实验结果验证了 OCT 检测方法用于区分翡翠透光特性的可行性,显示了 OCT 成像在辨别古玉钙化沁色特征中的应用潜力。

**关键词:**光学相干层析;光学成像与检测;透光特性;钙化;沁色

**中图分类号:**TP391;P619.28 **文献标识码:**A

## Imaging and analyzing subsurface morphologies of jade objects with optical coherence tomography

ZENG Nan, HE Yong-hong, MA Hui

(Laboratory of Optical Imaging and Sensing, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** An application of optical coherence tomography to jade measurement was described. An optical coherence tomography (OCT) system applied in jade imaging and measurement was implemented with scanning speed of 1 frame/s, depth resolution of 15  $\mu\text{m}$  and penetration depth of 3mm. The experimental results and theoretical analysis of jade imaging and measurement based on OCT method were demonstrated. By analyzing the optical backscattering data based on the variation with depth and the distribution in tomography plane, the transparency of jade could be characterized qualitatively; meanwhile, OCT imaging could be used to observe and provide some discrimination information of the impregnation and calcification of ancient jade materials. The experimental results give an available microstructure information, confirm the feasibility of OCT method in evaluating transmission features of jades, and show a potential of OCT in analyzing subsurface morphologies of archaic jades.

**Key words:** optical coherence tomography; optical imaging and measurement; transparency; calcification; impregnation

## 1 引言

近年来,光学相干层析(OCT)以其高灵敏、高清晰、无损在线检测等特性,成为目前最具有发展前景的先进光学成像检测技术。该技术利用弱相干光干涉仪的基本原理,检测被测物不同深度层面对入射弱相干光的背向散射信号,通过扫描,得到二维或三维内部结构图像<sup>[1-4]</sup>。随着成像模式和技术方案上的研究进展,OCT技术在生物医学领域的应用报道日益增多,包括眼科诊断<sup>[5-6]</sup>,牙科疾病检测<sup>[7-8]</sup>,内窥疾病探查<sup>[9]</sup>等都是研究的热点,同时OCT成像功能用于解决一些特殊需求检测的潜力也日益显露,诸如用OCT技术开展镀膜分层、材料缺陷分析和珍珠质鉴别等也已初见报道<sup>[10-11]</sup>。

本文中针对宝石矿物学中翡翠透光特性和古玉特征鉴别两个难点问题,首次提出根据OCT的光学微观结构层析分辨图像表征翡翠透明度和净度的方法,并对古玉钙化和沁色部位进行研究和讨论。翡翠质地一般定义为颜色因素外的透明度和净度,前者表征翡翠对光的穿透能力,后者指翡翠中所含包体和杂质的程度。玉石饰品埋藏于地下年久后,会由于年代、土壤环境、地热等因素,受某些环境物质的侵蚀而发生质地变化和沁入,造成形态和颜色改变,称作沁色和钙化作用。而人工的古玉效果一般是通过热处理等对钙化沁色表面进行模仿,因此仿制品的内部结构一般与真正的古玉是不同的。在以上两个问题中,检测对象的差异均与玉石的矿物组成、结晶颗粒大小、晶体形态及排列方式等结构特征相关,并引起光在玉石中传输的反射折射现象,因此基于表面下纵深结构光学散射反射的OCT方法可能为评估翡翠的透光特性和古玉的钙化沁色特征提供依据。

目前已报道的玉石检测方法多数建立在化学成分分析基础上,如原子吸收光谱、X射线荧光分析、电子探针微量分析、拉曼光谱分析等。这些检测方法只能给出玉石的化学成分分布,而无法给出其内部结构形态分布的信息,且其中一些检测方法成本太高,操作复杂。对于透光特性的评估曾提出过光度计法和光柱法两种测量单位厚度白光透过率的方案<sup>[12]</sup>,这两种测量方法由于通过测

量白光透过率的方法检测,因此无法对镶嵌的样品进行检测;对厚度差别大的不同翡翠也难以进行准确的测量判断;对于具有非均匀透明度的翡翠样品,不能显示透光特性的分布变化规律;并且,不同颜色的翡翠对白光可见波段的吸收不同,会对光透过率的检测带来误差。在古玉沁色钙化鉴别方面<sup>[13]</sup>,现有技术还以主观经验判断为主,缺乏基于客观数据的科学方法辅助。OCT光学成像方法本身的背向层析能力能克服样品对镶嵌和厚度的限制,直观反映玉石内部微观结构的形态分布,近红外检测波段不受玉石吸收差异的影响,并能通过对高分辨二维深度切片数据进行处理表征其光学特性以及相应的结构特征。

## 2 实验方法与装置

实验用的OCT成像装置原理结构如图1所示,系统的光学部分基于光纤Michelson干涉仪系统,信号光源所发出的弱相干光(近红外光,如1300 nm)从一端注入一个 $2 \times 1$ 光纤耦合器 $FC_1$ ;同时指示光源发出的可见光注入另一 $2 \times 1$ 光纤耦合器 $FC_3$ ;  $FC_1$ 和 $FC_3$ 再接入一 $2 \times 2$ 光纤耦合器 $FC_2$ ,在这里被分为两束,其中一束出射后经准直到参考反射镜,另一束出射且经准直并被物镜聚焦后照射到玉石样品。被参考镜和样品的各层反射的光再次进入光纤,并在 $2 \times 2$ 耦合器 $FC_2$ 相遇发生干涉叠加。叠加后的光场被分束并经过 $FC_1$ 、 $FC_3$ 到达其另一端,其强度信号被探测器 $D_1$ 、 $D_2$ 所测量。OCT采用宽带光源,光源弱相干性导致干涉信号仅能出现在参考光程与样品光

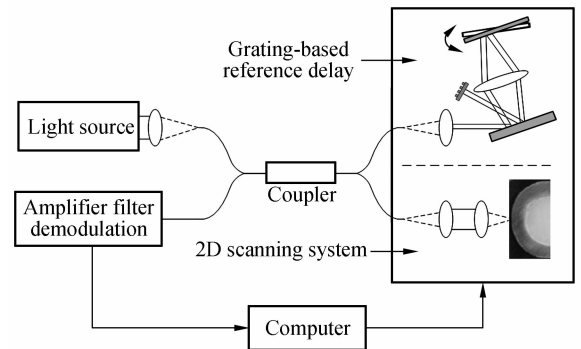


图1 用于玉石结构检测的OCT系统示意图

Fig. 1 Scheme of OCT imaging system for jade structure detection

程匹配时,由此伴随参考镜的深度扫描,探测光强中包含干涉信息的最后一项具有选择性仅反映与参考光程相匹配的来自玉石特定深度层面的背向散射信号。同时当参考镜平移扫描时,将产生对干涉信号的多普勒频率调制。于是,将  $D_1$ 、 $D_2$  所测量信号差分放大后,进行滤波、解调制处理,可以得到在参考光路的一个扫描周期内玉石样品的背向反射光强,也就实现了对玉石内部结构信息的一维层析,进而对样品表面进行横向扫描就可以得到二维深度分辨图像信息。

由于光学弱相干干涉信号的强度随着光程差  $\Delta l$  的变化也呈现一个高斯线形的分布,其半高全宽即 OCT 深度探测的分辨率  $\Delta z_R$  为

$$\Delta z_R = \frac{2 \ln 2}{\pi} \left( \frac{\lambda_0^2}{\Delta \lambda_0} \right). \quad (1)$$

本实验中玉石检测时的纵向分辨率受光源特性和光路色散的综合作用,实际值为  $15 \mu\text{m}$ 。玉石检测时光学相干层析系统的横向分辨率  $\Delta x_R$  取决于样品探测部分的光学聚焦特性,为

$$\Delta x_R \approx \frac{4\lambda_0}{\pi} \frac{f}{d}, \quad (2)$$

$d$  是聚焦透镜上的光斑直径,  $f$  是透镜焦距。光斑在样品上聚焦的越小,则横向分辨率越高,而相应的焦深也会越小,实际测量中横向分辨率的选择需要综合考虑纵向焦深的因素。本实验中的实际横向分辨率为  $40 \mu\text{m}$ 。

实验中搭建的光学相干层析系统具有以下特点:(1)硬玉在近红外光区吸收特性随波长变化不明显,为此实验中选用了能同时保证穿透深度和无损检测的 SLD 宽带光源(中心波长  $1310 \text{ nm}$ , 功率  $8 \text{ mW}$ , 谱宽  $50 \text{ nm}$ );(2)实验装置中参考光程扫描采用了基于衍射光栅的傅里叶域光学快速扫描延迟线技术,既可以满足快速成像( $1 \text{ frame/s}$ )的需要,又可以通过光路调节实现色散补偿,同时对偏振态不敏感;(3)实验装置采用了光纤光学元件、光电模块分离和软件控制测量界面,使得成像系统整体具备便携性和易操作性。

### 3 实验结果和讨论

#### 3.1 翡翠透光特性分析

翡翠的透明度表征翡翠对光的穿透能力,净度指翡翠中所含包体和杂质的程度,二者均与翡

翠的矿物组成、结晶颗粒大小、晶体形态及排列方式等结构特征有着直接而密切的关系。从结构特性上看,翡翠是一种多品质集合材料,主要成分是硬玉,而内部结构中存在的晶间间隙、解理缝及包体和杂质等与硬玉折射率不同,光通过这些界面时将会发生反射和散射效应,损耗光能使透光特性变差。因此可以将翡翠透明度、净度相关的结构特征与光学反射散射特性联系起来,而 OCT 方法在测量翡翠散射反射特性时通过弱相干原理将物质内部不同深度的结构层析分辨出来,获得的是光穿透物质时透光特性的纵深变化规律,而普通透射反射成像检测的是光穿透深度内所有结构特征对透光特性的累积作用效应,相比之下,OCT 方法不仅可以反映透光特性的强弱,而且可以获取翡翠内部透光特性的差异分布。

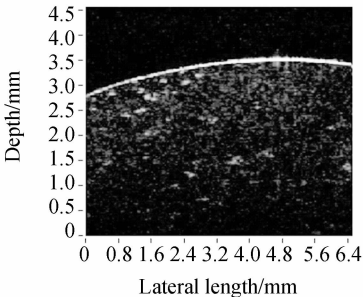
从物理解释上分析,与翡翠透光特性相关的透明度和净度特征与其矿物组成和排布方式两方面结构形态分布存在以下关联:(1)在结构特征相似的情况下,矿物成份复杂多样的翡翠样品净度较差。因为多重矿物成分之间的折射率差异会引起明显的界面反射效应,同时成份复杂的玉石容易由于风化、沁色等作用改变其原有的规则物理特性,引起光学散射效应的增强;(2)在矿物成分均一的情况下,晶粒结构排列紧密、尺寸均一的样品透明度较好,反之较差,这是因为如果颗粒排列具有不规则碎裂特征并且疏松,则容易沁入其他非玉石物质,使整体玉石特性偏离晶体结构较远,引起明显的颗粒光散射效应。(3)玉石中由于加工不当或者染色等引入的裂纹和杂质也会引起明显的反射折射效应从而降低透明度和净度。

图 2 的 4 张 OCT 图像反映了不同透明度 4 个翡翠样品光学反射、散射特性的层析分布,从中可以建立图像特征与翡翠质地之间的两方面联系:

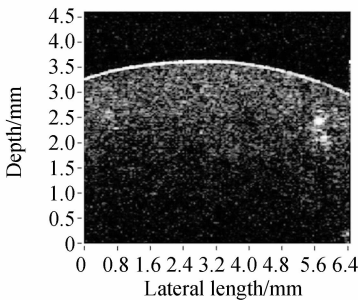
(1) OCT 图像上样品内部的散射沿纵深方向的强弱变化可以作为翡翠透明度的检测参考。以翡翠光洁表面形成的高亮反射线为参照,质地好的样品内部整体散射强度较弱,成像画面具有高透明物质的暗色特征,而质地差的样品内部整体散射强度较强,成像画面具有高散射介质的亮色特征。OCT 图像中反映的这种纵向散射强度的强弱变化可以结合翡翠的透明度相关结构特征进行解释:透明度好的翡翠晶粒呈尺寸细腻的纤

维状或微粒状,接触边界一般呈弯曲状、齿状,结合紧密,光通过时不会发生明显的反射散射效应,而透明度差的翡翠晶粒尺寸粗糙、排列疏松、接触边界清晰呈直线状,存在较多的间隙和解理,容易成为光反射界面,也容易由于风化、沁色等作用改变其原有的规则物理特性,引起光学散射效应的增强。

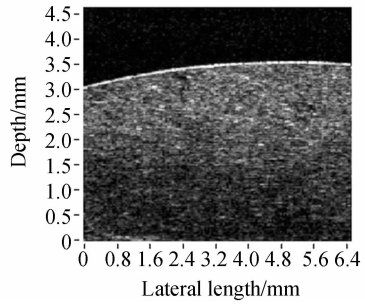
(2)OCT 图像上样品在二维被测区域的散射分布均匀性可以作为翡翠净度的检测参考。质地好的样品散射光强分布均匀、异常散射突出结构特征较少,质地差的样品散射光强分布无规则、有明显异常散射突出结构特征。OCT 图像中反映的这种散射分布均匀性可以结合翡翠的净度相关结构特征进行解释:净度好的翡翠矿物组成单一、含有较少包裹体和其他杂质,入射光沿深度方向发生的反射散射信号表现为规则衰减,存在较少特异点,而净度差的翡翠的多重矿物成分之间的折射率差异会引起明显的界面反射效应,由于加工不当或者染色等引入的裂纹和杂质也会引起明显的反射散射效应,从而体现在 OCT 图像中。



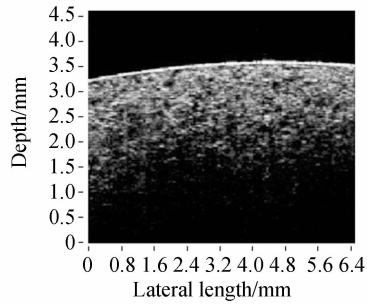
(a)样品具有高透明度和较高净度,光穿透深度很深  
(a) Jade sample with the best transparency, better clarity and bigger penetration depth



(b)样品具有高净度和较高透明度,光穿透深度很深  
(b) Jade sample with better transparency, the best clarity and bigger penetration depth



(c)样品具有较低透明度和较低净度,光穿透深度较深  
(c) Jade sample with lower transparency, lower clarity and big penetration depth



(d)样品具有低透明度和低净度,光穿透深度浅  
(d) Jade sample with the lowest transparency, the lowest clarity and small penetration depth

图 2 不同透光特性翡翠样品的典型 OCT 图像  
Fig. 2 OCT images of jade samples with different transparency qualities

为了便于定量区分翡翠样品的透光特性,根据以上对翡翠样品透明度的直观描述,考虑翡翠本身是透光特性较明显的介质,且 OCT 成像方法本身提取的基本是单次散射后的相干性光子,可认为光在翡翠中的传输满足单次散射介质模型中随穿透深度沿指数衰减的变化规律,因此 OCT 成像检测到的深度  $z$  处的光强理想情况下应满足公式:

$$I(z) = I_0 \exp(-2u_s z), \quad (3)$$

式中,  $u_s$  表征散射物质的平均散射系数,它是用来衡量翡翠被测区域平均散射特性,即样品透明度的参量。首先滤除二维 OCT 成像数据中翡翠表面高反射数据,然后将被测样品区域的二维纵深数据进行平滑处理(此处采用中值滤波算法),一方面可以提高信噪比,另一方面也可降低深度方向上少数光强变化奇异点对  $u_s$  参量提取的影响,经过平滑滤波后的成像数据基于式(3)进行指

数拟合时不会改变平均散射系数的取值,图3显示了图2中4个样品OCT成像数据的纵深归一化拟合曲线,图中曲线从上到下依次对应图2中的(a)~(d),曲线沿指数规律下降愈快说明平均散射系数值增大,表征翡翠内部的散射愈强,即透明度愈差。

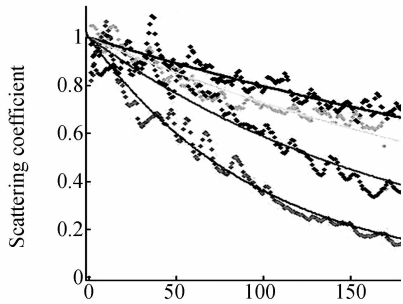


图3 翡翠OCT图像的平均散射系数拟合曲线

Fig. 3 Curves of backscattering value based on OCT jade imaging

根据上文分析,OCT光散射数据二维切面分布中的突出亮度像素点反映了翡翠内局部结构由于包裹体等成分差异引起的光散射属性的突变,光强突变点愈多,表示翡翠样品内部的异常包裹体和杂质愈多,净度愈差。因此,可以通过计算散射数据中突变数据点占全部成像数据的比例来表征被测翡翠的净度特性。具体做法是,首先对被测样品区域的二维纵深数据进行突出结构分布的锐化处理—边缘sobel算子法,查找图像数据沿某一方向一阶导数的极值和图像二阶导数的零穿越点,从而确定并标记散射成像数值突变的位

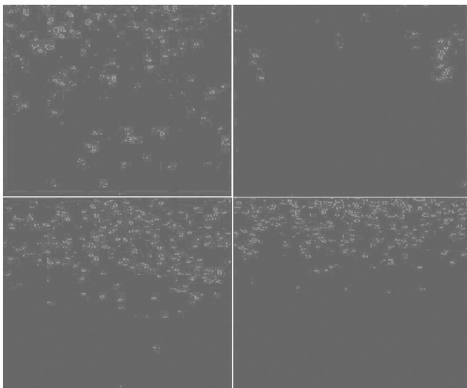


图4 翡翠OCT图像的散射奇异点标记图像

Fig. 4 OCT jade images after sharpening and marking

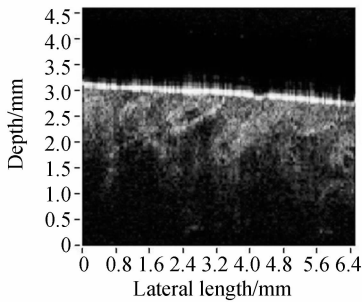
置和范围,是一种强化特征提取的边缘检测处理。图4是图2的4张OCT图像经过数据处理标记后的图像,图中被标记像素的比例可作为一个成像参量表征翡翠的净度特征,4个样品虽然在透明度特征上如上 $a>b>c>d$ ,但在净度特征上 $b>a>c>d$ 。

### 3.2 古玉钙化沁色特征分析

自古以来,中国人就根据古玉石沁色钙化特征鉴别和评价年代久远的古玉石,仅凭表面特征难以区分它们与通过热处理等精细过程仿制的人工古玉。本文进行的实验研究表明,OCT成像反映的古玉不同表面特征下的内部光学特性具有区分玉石玉质、钙化、沁色特征的可能性,具体实验结果及分析如下:

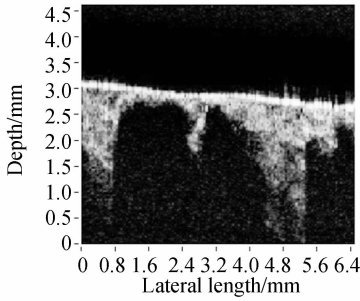
如图5,古玉中非钙化沁色的玉质结构(箭头3)类似翡翠,主要矿物组成是晶粒的规则排列,其OCT图像(见图5(c))显示较为均匀的光学弱散射特性,古玉钙化部分(箭头1)的OCT图像(见图5(a))具有较明显的光散射强度,一种相应的物理解释是钙化作用使得玉石结构的微观排布偏离了原有的规则晶体形式,而倾向于更小尺度的无序化微细颗粒,由于颗粒小于OCT分辨能力,因此使得单位像素尺度的散射强度相对增强,而各像素之间没有体现出明显差异,整体散射均匀性仍然较好;与前两者不同,古玉沁色部分(箭头2)表面下的OCT图像(见图5(b))呈现部分近乎无散射响应的区域,考虑到沁色是外界金属物质分子长期渗入玉石原有结构并与之相结合的过程,受沁后晶粒微细排布原有的反射折射特性被破坏,因此玉色本来的均匀散射特性会明显衰减,呈现图中的黑色阴影。

由于人工制作古代工艺是在短时间内利用高温染色等过程迅速令玉石的局部产生虚假的钙化沁色效果,这些加工过程通常只能实现玉石表面特征的模仿,而其内部结构不可能与真正古玉的钙化沁色作用相同。因此,通过古玉OCT图像的直观描述可以对其钙化沁色部分的真实性进行鉴别分析。从外观上看,图6的两个古玉样品钙化程度十分类似,但是经过OCT技术观测其内部结构的光学特性发现,样品(b)的OCT图像特



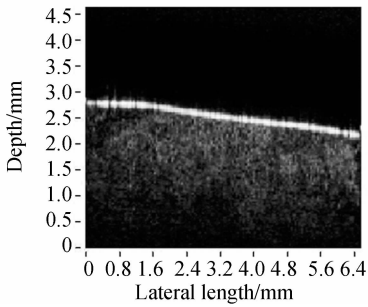
(a) 钙化部位的 OCT 图像

(a) OCT imaging of calcification part



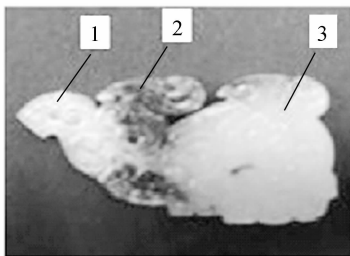
(b) 沁色部位的 OCT 图像

(b) OCT imaging of impregnation part



(c) 玉色部位的 OCT 图像

(c) OCT imaging of normal part

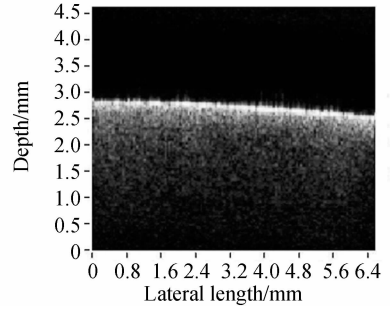


(d) 样品照片及检测部位标示

(d) Sample photo

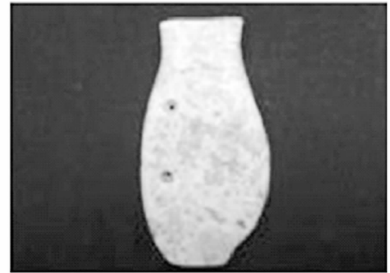
图 5 古玉龙佩

Fig. 5 Ancient jade dragon



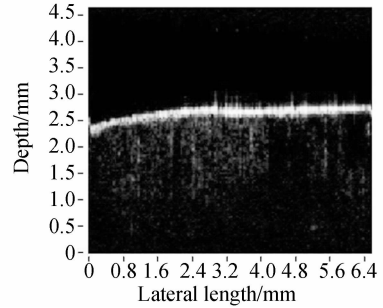
(a) 古玉鱼钙化部位的 OCT 图像

(a) OCT imaging of calcification part of ancient jade fish



(b) 古玉鱼的样品照片

(b) Sample photo of ancient jade fish



(c) 仿制古玉带钩钙化部位的 OCT 图像

(c) OCT imaging of calcification part of mock ancient



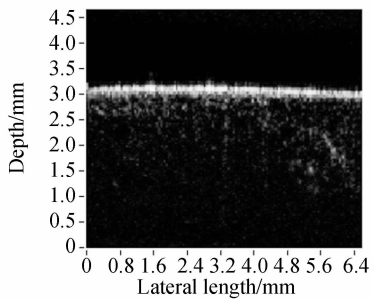
(d) 仿制古玉带钩的样品照片

(d) Sample photo of mock ancient jade belt hook

图 6 古玉鱼与仿制古玉带钩

Fig. 6 OCT images of ancient jade fish and mock ancient jade belt hook

征(见图 6(a))符合钙化结构的高散射均匀特性,而样品(d)则显示(见图 6(c))与钙化特征不符的较弱散射特性。图 7 的两个样品沁色效果也很相仿,但 OCT 图像中仅有样品(b)有类似沁色结构



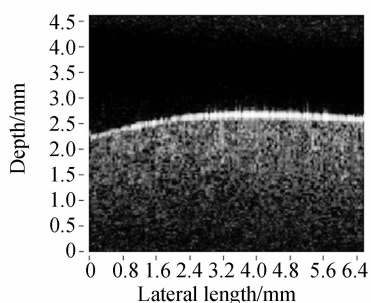
(a) 古玉熊沁色部位的 OCT 图像

(a) OCT imaging of impregnation part of ancient jade bear



(b) 古玉熊的样品照片

(b) Sample photo of ancient jade bear



(c) 仿制古玉蝉沁色部位的 OCT 图像

(c) OCT imaging of impregnation part of mock ancient jade cicada



(d) 仿制古玉蝉的样品照片

(d) Sample photo of mock ancient jade cicada

图 7 古玉熊和仿制古玉蝉的 OCT 图像

Fig. 7 OCT images of ancient jade bear and mock ancient jade cicada

的散射减弱现象(见图 7(a)),样品(d)的均匀散射强弱则与普通玉质接近。因此通过 OCT 图像特征比较,结合前文的物理分析,伪造古玉由于内部结构特征与真正的钙化沁色部位不同,其散射信号的强弱和分布均匀性可以为古玉的鉴别提供依据。

## 4 结 论

本文基于玉石结构中的光学反射散射特性,报道了光学相干层析这一新兴高清晰深度分辨技术反映结构组成进而评价玉石质地的新应用。实验结果和相应的物理分析显示了 OCT 这一无损高清晰结构分辨技术在解决翡翠透光特性评估、古玉质地分析两项宝石矿物学重点课题中的可行性。文中玉石 OCT 成像检测速度为 1 frame/s、纵向分辨率为  $15\ \mu\text{m}$ 、成像深度为 3 mm。阐述了通过 OCT 检测数据拟合平均散射特性曲线和计算散射特异点两个参量分别表征翡翠透明度和净度特征的方法,也通过对比正常和人为两种不同钙化和沁色效果下的 OCT 图像特征,显示了 OCT 技术应用于古玉质地分析的潜力。这些研究结果说明 OCT 在宝石矿物学鉴别评估中的应用价值仍有待进一步深入挖掘。

## 参考文献:

- [1] BRETT E B, GUILLERMO J T. *Handbook of Optical Coherence Tomography* [M]. Marcel Dekker, INC., 2002.
- [2] 俞晓峰,丁志华,陈宇恒,等. 光学相干层析多普勒成像功能拓展研究[J]. 光学学报, 2006, 26(11): 1717-1720.

- YU X F, DING ZH H, CHEN YU H, *et al.*. Functional expansion of optical coherence tomography for Doppler imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(11): 1717-1720. (in Chinese)
- [3] 胡海峰, 姚建铨, 张帆. 利用 Monte Carlo 模拟技术研究 OCT 图像对比度[J]. *光学 精密工程*, 2004, 12(1): 94-99.
- HU H F, YAO J Q, ZHANG F. Application of Monte Carlo simulation technology in OCT imaging contrast[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1): 94-99. (in Chinese)
- [4] 张运海, 廖文和, 沈建新. 准分子激光眼屈光手术中的一种过渡区模型[J]. *光学 精密工程*, 2004, 12(4): 406-410.
- ZHANG Y H, LIAO W H, SHEN J X. Blend zone model for excimer laser refractive surgery[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4): 406-410. (in Chinese)
- [5] SWANSON E A, IZATT J A, HEE M R, *et al.*. In vivo retinal imaging by optical coherence tomography[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(21): 1864-1866.
- [6] 邵永红, 何永红, 马辉, 等. 鼠眼睛前段光学相干层析成像[J]. *激光与红外*, 2006, 36(8): 694-695.
- SHAO Y H, HE Y H, MA H, *et al.*. Imaging mouse-eye-forepart by optical coherence tomography[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(8): 694-695. (in Chinese)
- [7] FELDCHEIN F, GELIKONOV G V, GELIKONOV V M, *et al.*. In vivo OCT imaging of hard and soft tissue of the oral cavity[J]. *Optics Express*, 1998, 3: 239-250.
- [8] 王淑霞, 何永红, 曾楠, 等. 光学相干层析用于牙齿病变的检测[J]. *激光生物学报*, 2007, 16(3): 355-358.
- WANG SH X, HE Y H, ZENG N, *et al.*. Tooth structure imaging with optical coherence tomography[J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2007, 16(3): 355-358. (in Chinese)
- [9] HERZ P R, CHEN Y, AGUIRRE A D, *et al.*. Micromotor endoscope catheter for in vivo, ultrahigh-resolution optical coherence tomography[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(19): 2261-2263.
- [10] XU F M, PUDAYAR H E, PRASAD P N. Confocal enhanced optical coherence tomography for nondestructive evaluation of paints and coatings[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(24): 1808-1810.
- [11] 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.
- 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. (in Chinese)
- [12] 赵明开. 再论翡翠透明度的测量方法与分级[J]. *宝石与宝石学杂志*, 2006, 8(3): 25-28.
- ZHAO M K. Measuring method and grading of transparency of jadeite jade[J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 2006, 8(3): 25-28. (in Chinese)
- [13] 许小玲. 古玉的沁色、染色及鉴别[J]. *宝石与宝石学杂志*, 2001, 3(2): 26-28.
- XU X L. Impregnation and dyeing of ancient jade and identification[J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 2001, 3(2): 26-28. (in Chinese)

作者简介: 曾楠(1979—), 女, 广东梅州人, 助理研究员, 主要从事光学检测成像技术在材料检测和医学诊断中的应用方面的研究。E-mail: zengnan@tsinghua.org.cn

(本栏目编辑 白雨虹)