

基于 OCT 技术对古代瓷釉断面结构特征的初步研究

严 鑫^{1,2} 董俊卿¹ 李青会¹ 郭木森³ 胡永庆³

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所科技考古中心, 上海 201800
² 中国科学院大学, 北京 100049; ³ 河南省文物考古研究院, 河南 郑州 450000)

摘要 为了验证将光学相干层析(OCT)成像技术应用于古代陶瓷无损检测,将 OCT 图像表现的釉面的断面特征用于古代陶瓷类别区分的可行性,利用宽波长频域 OCT 成像系统对选自 5 个窑口的 8 个不同釉系、色系的瓷片进行测试,得到了样品的断面结构图像,并分析了 OCT 图像中的气泡大小和分布、强散射颗粒分布、釉层均匀性、透射率、釉层的分层等特征。实验结果显示 8 个古代瓷釉样品 OCT 成像特征差异明显,说明 OCT 成像技术能基于断层图像特征对瓷釉的釉系、窑口进行区分。

关键词 测量;光学相干层析;无损成像;瓷釉

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0908001

Preliminary Research in Section Structure Characteristics of Ancient Glaze Based on OCT Technology

Yan Xin^{1,2} Dong Junqing¹ Li Qinghui¹ Guo Musen³ Hu Yongqing³

(¹ Center of Sci-Tech Archaeology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ Institute of Cultural Relics in Henan Province, Zhengzhou, Henan 450000, China)

Abstract In order to validate the possibility of using the optical coherence tomography (OCT) imaging technology to non-invasively exam the ancient porcelain and using the section characteristics of the glaze reflected by OCT images to ancient porcelain classification, an OCT imaging system is used to test 8 different type and color ancient porcelain chips selected from 5 different kilns. The section structure images of these samples are obtained. The characteristics of OCT images about the size and distribution of bubbles and strong scattering particles, the uniformity, stratification and transmittance of the glaze layer are analyzed. The experimental results show that the imaging characteristics of 8 different ancient porcelain samples obtained by OCT imaging technology have significant difference, illustrating that species and kilns of glaze can be distinguished based on the section characteristics by OCT imaging technology.

Key words measurement; optical coherence tomography; non-invasive imaging; glaze

OCIS codes 120.3180; 110.4500; 100.6950

1 引 言

光学相干层析(OCT)成像技术是一种基于共焦显微和迈克耳孙干涉原理的新型光学成像手段,具有无损伤、高分辨率、高灵敏度等优点^[1-2],被广

泛地应用于生物医学检测中^[3-4]。随着 OCT 技术的不断发展,其应用领域已渗透到材料学、薄膜技术、工业生产检测^[5]以及科技考古学^[6-9]等诸多领域中。

收稿日期: 2014-03-19; **收到修改稿日期:** 2014-04-14

基金项目: 国家 973 计划(2012CB720906,2012CB720901)、上海市研发平台专项项目(13DZ2295800)

作者简介: 严 鑫(1989—),男,硕士研究生,主要从事光学相干层析成像在材料无损检测方面的研究。

E-mail: 737890830@qq.com

导师简介: 李青会(1973—),男,博士,研究员,主要从事古代硅酸盐材料多方法检测方面的研究。

E-mail: qinghuil@sina.com(通信联系人)

瓷釉特征的分析在陶瓷考古中有着举足轻重的作用。目前,较常见的瓷釉分析方法主要有 X 射线荧光光谱(XRF)技术、拉曼光谱(RLS)技术、扫描电子显微镜(SEM)技术、X 射线衍射(XRD)技术。然而 XRF 和 RLS 常用来做常规的定性、定量分析和物相分析,其对陶瓷釉质的均匀性、胎釉结合状况的探测无能为力;SEM 被用来做微观区域的表面分析和元素分析,大多数只是用来对瓷片进行测试,对样品的制备要求高,且要克服陶瓷低的二次电子收集率(除非镀层导电膜),成像不清晰,仪器昂贵;基于 XRD 技术的研究属于破坏性的研究,一般用来辅助分析。

OCT 技术的出现为瓷釉特征的无损研究提供了一种崭新的技术手段,目前国内尚无相关报道,国外也刚开始相关研究,研究数量很少。Liang 等^[10]将 OCT 技术与 SEM 相结合,对古埃及彩陶和实验室制备的彩陶珠进行测试,发现了埃及古陶瓷表面釉层存在三种玻璃相,分析各个相层的清晰度,得出成像深度和材料的吸收系数相关。2008 年, Yang 等^[11]利用 OCT 技术对中国陶瓷釉的亚表面形态进行了相关分析,主要研究了几个不同样品的气泡、裂纹缺陷、晶体结晶以及相面结合情况的一些分析,给出了对应 OCT 图像的理解,对 OCT 在陶瓷釉面分

析方面的应用有很好的参考作用。2012 年, Yang 等^[12]利用 OCT 技术对中国宋代厚釉陶瓷进行了分析,主要研究了宋代几个不同厚釉瓷器样品中釉内部、胎釉结合面以及多层釉结合面的气泡的大小以及分布情况,证实了釉的色泽的通透情况跟釉质材料中方解石和氧化铝的比率有关。这些研究都是瓷釉的 OCT 图像特征的表现,而基于 OCT 图像特征的瓷釉种类识别未见报道。

本文采用超宽波长的频域 OCT 成像系统对选自 5 个窑口的 8 个不同釉系、色系的瓷片进行测试,结合显微镜观察,解释 OCT 图像,分析 OCT 图像中的断层结构特征,提出并验证了采用 OCT 图像断层结构特征描述不同种类的瓷釉的方案,展现了 OCT 技术应用于古代瓷釉分析的重要意义。

2 实验装置

实验采用的是中国科学院上海光学精密机械研究所科技考古中心的超宽波长频域 OCT 系统^[13-15],其结构如图 1 所示。主要由高速扫描激光(HSL)光源(波长范围为 900~1600 nm,最大功率为 50 mW)、干涉仪(日本 Santec 公司 IV-2000 型)、测量臂和计算机组成。

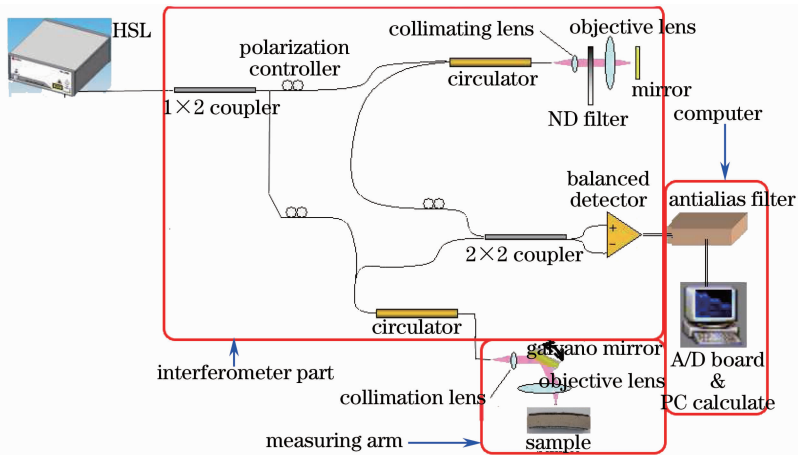


图 1 OCT 系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of OCT system

HSL 发出激光经 1×2 的耦合器分为两束,一束光经偏振控制器、循环器、准直镜、减光镜(ND filter)、物镜照射到反射镜上,被反射作为参考光。另一束光经偏振控制器、循环器、准直镜、振镜、物镜照射到被探测物体上,物体散射回来的光作为测量光。参考光被光纤收集,经循环器、偏振控制器后与经过循环器返回的测量光在 2×2 耦合器中耦合、干涉,输出信号

被平衡检波器探测,经平滑滤波后传输进模数(A/D)转换板,经计算机处理,得到 OCT 图像。

3 实验结果和分析

3.1 样品信息

实验室测试了大量的瓷片样品,现选取 8 片不同的瓷片为代表,如图 2 所示,1、2 号样品为广东省

文物考古研究所选送的白瓷和青花瓷,3、4、5号样品为河南省文物考古研究院选送的青瓷、青瓷和钧瓷样品,6、7、8号为郑州大学选送的钧釉瓷样品。

分别对其进行 OCT 测试,测试点的位置如图 2 中红色线所示。各个样品的瓷系、年代介绍如表 1 所示。

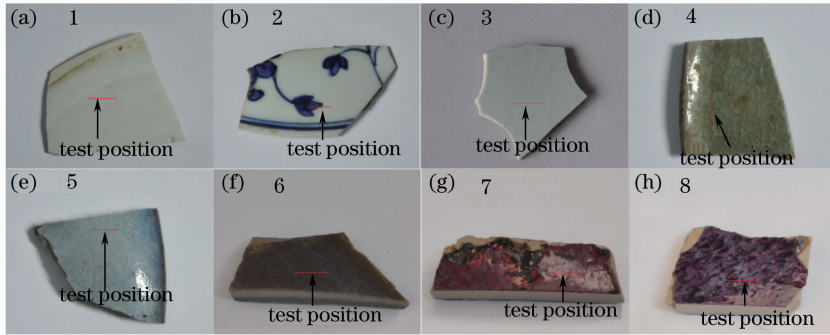


图 2 陶瓷样品及测试位置

Fig.2 Porcelain samples and test positions

表 1 样品的介绍

Table 1 Introduction of samples

Number	Type	Description
1	White porcelain	Song dynasty white porcelain from Jingdezhen kiln
2	Blue and white porcelain	Ming dynasty blue and white porcelain from Jingdezhen kiln
3	Celadon	Song and Jin dynasty celadon from Zhanggongxiang kiln in Ruzhou
4	Celadon	Northern Song dynasty celadon from Qingliangsi kiln in Baofeng
5	Jun porcelain	Yuan dynasty jun porcelain from Dayudonggou kiln in Ruzhou
6	Jun porcelain	Song dynasty Jun porcelain from Jun kiln in Yuzhou
7	Jun porcelain	Song dynasty Jun porcelain from Jun kiln in Yuzhou
8	Jun porcelain	Song dynasty Jun porcelain from Jun kiln in Yuzhou

3.2 测试结果与分析

设置测试条件:HSL 激光光源功率设置为 30 mW;由于瓷釉折射率较难测量,实验的时候将折射率统一设置为 1.000;信号探测的积分次数设置为 8;选择二维成像模式;图像对比度根据实测的情况微调,大致范围为-5 dB~60 dB。

利用 OCT 系统对所选的 8 个样品进行二维断层扫描成像,并对比 6、7、8 号样品断面的显微放大图像,研究表明 OCT 成像技术可以反映出不同种类、不同特征的瓷釉样品的二维断层扫描成像上的差异,验证了将 OCT 技术应用于古代陶瓷无损检测、将釉面的断面结构特征用于古代陶瓷类别区分的可行性。

3.2.1 样品的 OCT 测试图像

折射率的突变会导致物体散射光变强,在 OCT 灰度图像上表现为亮的点^[11]。对于瓷器而言,一般会有空气和釉的分界以及釉和胎体的分界,在 OCT 图像上,由于空气和釉分界处折射率的突变,会导致强的光散射,整个分界面表现为一条亮线;釉和胎体分界面情况有所不同,由于釉在烧制过程中会渗透

到胎里,釉和胎体的折射率差异也很大,整个渗透区域里都会有强的光散射,分界面会呈亮带状延伸。釉质中气泡和晶体颗粒也普遍存在,对于气泡,其内部为空气,外部为釉层,在整个气泡表面有大的折射率差异,散射光强,会产生圆形亮区。但是,气泡侧向的强散射光超出了探测距离,只能探测到气泡上下表面的散射光,因此,在 OCT 图像上表现为两条平行的、高亮的短线;对于晶体颗粒,由于其折射率与釉层的差异,会产生强散射,表现为亮点或亮块。瓷器多层施釉也是常有的,对于多层釉的情况,由于各个釉层的透射率差异,会表现为不同的灰度级层次,但是各层釉折射率的差异不大,层次界面突变小,散射亮度没有透射率差异引起的灰度层次明显。

1 号样品为宋代景德镇窑的白瓷,釉面成白色,通透,肉眼看无明显气泡,釉层较薄,测试结果如图 3 所示,瓷釉中气泡较小,且分布较少;釉层中基本是黑色区域,可见其散射弱,透射率较高,釉层釉质均匀,且无明显的强散射颗粒;釉和胎分界面散射强,清晰可见,且相对较为平整。

2 号样品为明代景德镇窑的青花瓷,无青花部

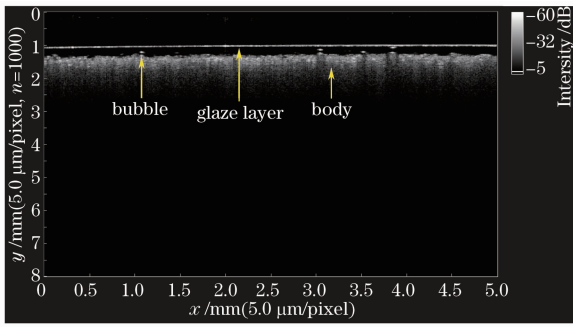


图 3 1号样品的 OCT 图像

Fig. 3 OCT picture of No. 1 sample

分泛白色、通透,肉眼看无明显气泡,有青花部分呈蓝色,质地较通透,肉眼看无明显气泡,测试结果如图 4 所示,其中蓝色部分是青花部分的测试情况,白色部分是无青花部分测试的结果。在整个釉层区域中,分布着一些小气泡,且数量较多;釉层中存在黑色和灰色区域,可见其散射情况存在差异,釉质不均匀,且还存在一些强散射颗粒。在白色无青花区域,釉和胎分界面散射较强,清晰可见,且相对平整;青花采用釉下彩工艺,在蓝色青花区域,还存在着一层钴料彩绘层,和釉层明显不同,散射较强,钴料彩绘层散射较均匀,透射率较低。而此区域的钴料和胎的结合面散射较弱,但相对平整,且黑色分界线清晰可见,黑色分界线可能是由于透明釉渗透到钴料彩绘层和胎之间的空隙所致。

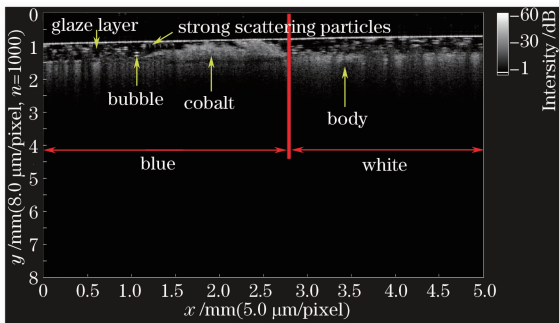


图 4 2号样品的 OCT 图像

Fig. 4 OCT picture of No. 2 sample

3号样品为宋金时期汝州张公巷窑的青瓷,釉层致密,泛青色,乳浊感较强,肉眼见不到气泡。测试结果如图 5 所示,瓷釉部分气泡较小,相对较少,釉层区域亮,散射强,散射亮度分布不均匀,透射率低,表明釉质不均匀,且存在着大量的强散射颗粒;釉和胎分界面亮度较低,但分界线还是可以清晰识别,釉和胎分界面较为平整。

4号样品为北宋宝丰清凉寺窑的青瓷,釉面泛青色,釉层稍厚,肉眼可以见到气泡,釉质通透。测

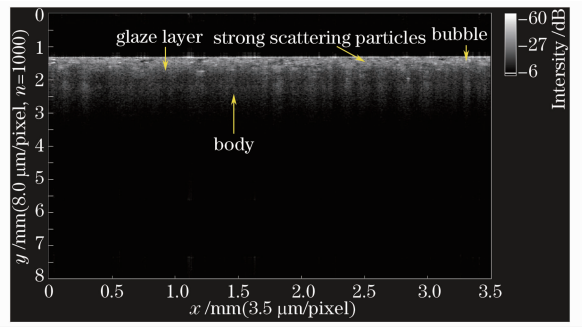


图 5 3号样品的 OCT 图像

Fig. 5 OCT picture of No. 3 sample

试结果如图 6 所示,瓷釉中气泡较大,且数量较多;釉层中以黑色区域为主,存在云状灰色区域,黑色区域散射弱、透射率高,灰色区域散射稍强、透射率低,可见其釉层均匀性一般,存在较大的云团状散射物质,同时,釉层中也存在较多的强散射颗粒;釉和胎分界面散射强,清晰可见,且较为平整。

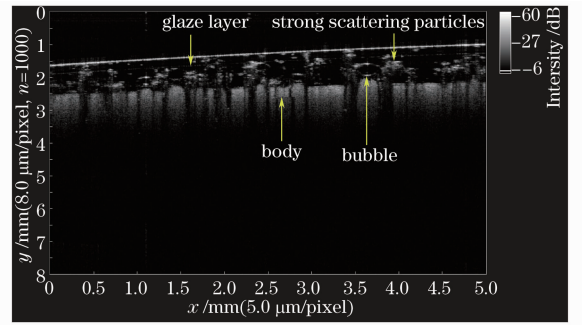


图 6 4号样品的 OCT 图像

Fig. 6 OCT picture of No. 4 sample

5号样品为元代汝州大峪东沟窑的钧瓷片,釉面呈蓝色,釉层很厚,釉质致密,不通透,肉眼能看到明显的大气泡,测试结果如图 7 所示,瓷釉中气泡很大,且很多,小气泡也随处可见;釉层区域亮,但亮度分布不均匀,表明瓷釉的散射强,且釉质不均匀,其透光性差;此外,釉层中存在大量强散射颗粒;釉和胎分界面散射弱,但分界线依稀可见,且较为平整。

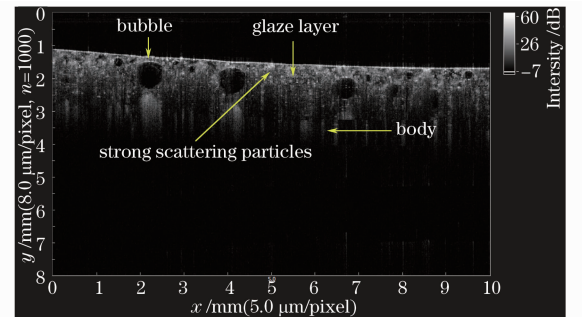


图 7 5号样品的 OCT 图像

Fig. 7 OCT picture of No. 5 sample

6 号样品为宋代禹州钧官窑瓷片,釉层呈酱色偏蓝,釉层较厚,可见釉层分层,肉眼可以看到小气泡,釉质较致密,具有乳浊效果。测试结果如图 8 所示,可以看出其釉有两层,一层是暗灰色区域釉层 1,一层是黑色区域釉层 2,通过对瓷釉截面的观察(见图 8 右下显微照片),可知暗灰色区域为蓝色釉,黑色区域为酱色釉。整个釉层中气泡很多,且都不是很大。蓝色釉和酱色釉因釉质的差异而显示出不同的散射特性:蓝色釉层部分散射较强,透射率低;酱色釉层部分散射较弱,透射率高。从图 8 中可以看到,整体釉质的均匀性较差,且釉层中存在大量的强散射颗粒。釉和胎分界面散射强,清晰可见,且较为平整。

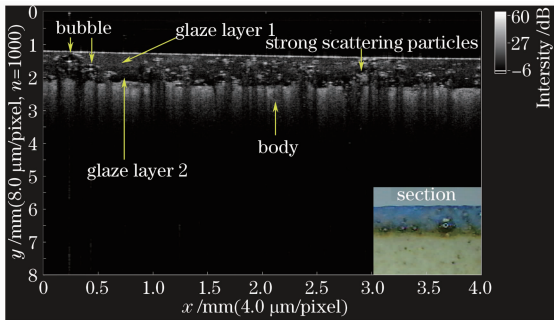


图 8 6 号样品的 OCT 图像

Fig. 8 OCT picture of No. 6 sample

7 号样品为宋代禹州钧官窑瓷片,釉面呈鸡血红色,观察断面可以看到三层釉层,釉质较致密,肉眼可以见到较大的气泡。测试结果如图 9 所示,可以看出其釉有三层之多,分层情况如图中标注。结合 7 号样品截面的观察情况(见图 9 右下显微照片),可知釉层 1 对应样品的红色釉部分,釉层 2 对应样品的蓝色釉部分,釉层 3 对应的样品的黄色釉部分。釉层中存在很多小气泡,大气泡不常见。釉层釉质的差异在 OCT 图像上表现为不同的特征:釉层 1 亮度高,散射强,透射率较低,且亮度分布均匀,表明釉质较均匀;釉层 2 亮度分布不均匀,釉质的均匀性差,且整体亮度较低,散射较弱,透射率较高;釉层 3 较薄,散射亮度介于 1、3 釉层之间,总体来看,均匀性也是介于 1、3 釉层之间。釉层中也存在大量的强散射颗粒(强散射颗粒都是相当于本层釉层而言的),特别是釉层 2 中,而釉层 1、3 中强散射颗粒较少。釉和胎交界面散射较强,清晰可见,且较为平整。

8 号样品为宋代禹州钧官窑瓷片,呈葡萄紫色,表面有蓝紫条纹,从断面看釉层有三层,釉质较致密,肉眼可见较大的气泡。测试结果如图 10 所示,可以看出其釉有三层,分层情况如图中标注。结合

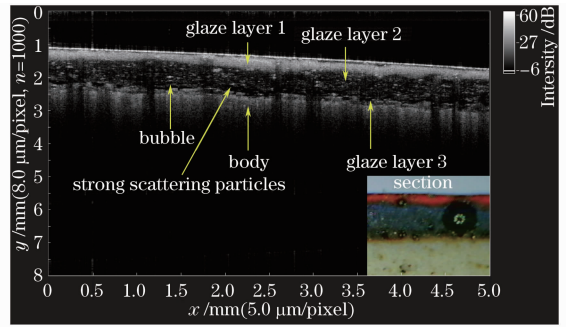


图 9 7 号样品的 OCT 图像

Fig. 9 OCT picture of No. 7 sample

8 号样品截面的观察情况(如图 10 右下显微照片所示),可知釉层 1 对应样品的红色釉部分,釉层 2 对应样品的蓝色釉部分,釉层 3 对应的样品的黄色釉部分。整个釉层中,大气泡和小气泡都有,且气泡较多。仔细观察釉层 1,可以发现其中的亮度变化有层次感,对应于 8 号样品截面的情况可知其红色釉层部分渗透进了蓝色釉,两种釉层的变化导致了 OCT 图像上亮度的层次变化。

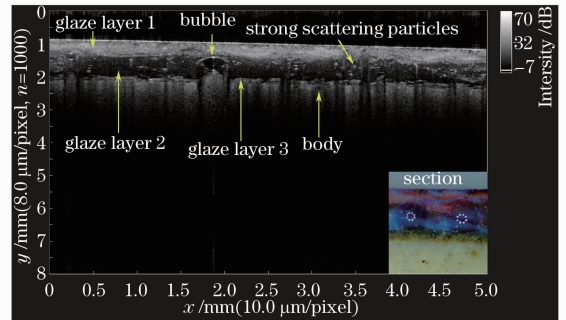


图 10 8 号样品的 OCT 图像

Fig. 10 OCT picture of No. 8 sample

3.2.2 结果分析与讨论

基于实验室大量样品的测试结果,对比上面 8 个样品的 OCT 图像,可以看出:景德镇白瓷的 OCT 图像特征表现为釉质均匀,釉层气泡较少,釉层散射基本没有,强散射颗粒极少胎釉分界面高亮,清晰;景德镇青花瓷的釉层存在强散射,小气泡和强散射颗粒较多,非青花部分胎釉分界面亮度高、清晰,青花部分钴料彩绘层清晰、均匀,钴料彩绘层和胎之间存在清晰的黑色分界线;青瓷的釉质有乳浊釉和透明釉之分,两者 OCT 图像差异也很明显,乳浊釉釉层散射强,亮度高但不均匀,气泡小而少,胎釉结合面较不明显,透明釉层以黑色无散射区为主,强散射区域呈云状分布,气泡大且多,强散射颗粒也较多,胎釉分界面亮度高、清晰,说明瓷釉的 OCT 图像特征与同种色釉着色剂关系相对较弱,与釉层厚度、均

匀性等密切相关;汝州东沟窑钧瓷气泡很大,且很多,釉层散射强,强散射颗粒很多,胎釉分界面不清晰;禹州钧官窑瓷片,釉层较多,呈现不同的灰度变化,气泡较多,大小不均,强散射颗粒也较多,胎釉分界面亮度较高,且清晰可见。与汝州东沟窑钧瓷相比,禹州钧官窑的釉层分层现象明显,但两者在气泡特征和强散射颗粒分布上具有相似性,可见 OCT 图像可以很好地反映钧釉系列瓷釉的相似特征以及不同窑口不同时代的差异。

不同类瓷釉的 OCT 图像差异明显,同种瓷釉具有十分相似的特征,说明可以通过 OCT 图像的图像特征佐证瓷釉的种类,为古代瓷釉特征的研究提供了一种可行的方法,更是为将釉面的断面结构特征用于古代陶瓷类别和窑口的区分提供了可能,克服以往过度依赖化学成分分析判定古代陶瓷的局限。

下步目标为进行大量的实验,总结各类瓷片的断层图像特征,结合 RLS、SEM 技术,对强散射颗粒、釉质的晶相等进行分析、总结,根据这些图像特征以及微区分析,建立图形库,实现不同时代、不同窑口、不同釉系的古代瓷釉的图像特征的识别。

4 结 论

将 OCT 成像技术作为一种无损的断层检测技术,初步应用到我国古代几种典型釉系的瓷釉特征研究中,通过 OCT 图像的图像特征,解析瓷釉的釉质均匀性、釉层的分层情况、瓷釉中的气泡的有无及分布情况、瓷釉中强散射颗粒的有无及分布情况、胎釉分界面情况等,并对不同类型的瓷釉进行特征归类,说明运用 OCT 技术能对不同釉系的瓷釉、同种釉系不同釉色的瓷釉以及同种色系不同窑口的瓷釉特征进行测试、区分和归类。实验也验证了通过图像特征的手段去佐证瓷釉类别的可能性,提出了建立不同类别瓷器 OCT 断层图像特征图形库以识别瓷釉类别的方案设想。

目前对于 OCT 断层图像特征图形库的建立,需要借助数字图像处理的知识,进行图像特征提取及归类的工作。然而,对于 OCT 图像,其复杂的变化导致难以找到一个普适的算法。今后的工作中,数字图像处理的算法设计及应用是个难点。

致谢:感谢郑州大学李国霞教授提供钧官窑瓷片样品;感谢广东省文物考古研究所提供白瓷和青花瓷

样品;感谢中国科学院上海光学精密机械研究所何红副研究员在实验过程中的支持。

参 考 文 献

- Huang D, Swanson E A, Lin C P, *et al.*. Optical coherence tomography[J]. *Science*, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- Bouma B E, Tearney G J. *Handbook of Optical Coherence Tomography*[M]. New York: Marcel Dekker, Inc, 2002.
- Li Peng, Huang Run, Gao Wanrong. Experiment research on optical coherence tomography of human skin[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(10): 2498-2502.
李 鹏, 黄 润, 高万荣. 光学相干层析术在人体皮肤成像方面的实验研究[J]. *中国激光*, 2009, 36(10): 2498-2502.
- Meng Zhuo, Yao X Steve, Yao Hui, *et al.*. Detecting early artificial caries by using optical coherence tomography [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(11): 2709-2713.
孟 卓, 姚晓天, 姚 辉, 等. 光学相干层析用于检测早期人工龋齿[J]. *中国激光*, 2010, 37(11): 2709-2713.
- Yu Haiming, Niu Yuan, Liu Guilin, *et al.*. Sweep light source OCT method for the test of textured monocrystalline silicon[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(2): 021701.
于海民, 牛 源, 刘桂林, 等. 扫频光源 OCT 对单晶硅片制绒质量的检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(2): 021701.
- Xu Peng, He Hong, Ding Zhihua. Research in subsurface morphologies of jades with optical coherence tomography[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(5): 0508004.
许 鹏, 何 红, 丁志华. 光学相干层析应用于玉石亚表面结构的研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(5): 0508004.
- P Targowski, M Iwanicka, M Sylwestrzak, *et al.*. OCT structural examination of 'Madonna dei Fusi' by Leonardo da Vinci[C]. *SPIE*, 2013, 8790: 87900N.
- H Liang, B Peric, M Hughes, *et al.*. Optical coherence tomography for art conservation & archaeology[C]. *SPIE*, 2007, 6618: 661805.
- P Targowski, M Iwanicka. Optical coherence tomography: its role in the non-invasive structural examination and conservation of cultural heritage objects—a review[J]. *Appl Phys A*, 2012, 106(2): 265-277.
- 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.
- 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.
- 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.
- Minghui Chen, Zhihua Ding, Lei Xu, *et al.*. All-fiber ring-cavity based frequency swept laser source for frequency domain OCT [J]. *Chin Opt Lett*, 2010, 8(2): 202-205.
- Tong Wu, Youwen Liu. Optimal non-uniform fast Fourier transform for high-speed swept source optical coherence tomography[J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(2): 021702.
- Xi Peng, Mei Kai, Brauler T, *et al.*. Evaluation of spectrometric parameters in spectral-domain optical coherence tomography[J]. *Appl Opt*, 2011, 50(3): 366-372.

栏目编辑:何卓铭