

古代瓷釉光学相干层析图像的纹理特征分析研究

严 鑫¹ 董俊卿¹ 刘卫东^{1,2} 李青会¹

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武汉东羽光机电科技有限公司, 湖北 武汉 430073

摘要 为了对古代瓷釉的结构特征进行量化表征,基于图像的统计直方图以及灰度共生矩阵提取出了7个纹理特征参数,用来对4种不同类型典型素面瓷釉样品的光学相干层析(OCT)图像进行描述。对比分析发现4种瓷釉的7个纹理特征参数差异明显。同时利用未知样品对基于K-邻近分类和7个纹理特征参数的瓷釉自动识别方案进行了可行性验证,得到了未知样品的正确的分类结果。实验结果表明:7个特征参数可以很好地表征瓷釉的釉层结构特征,基于K-邻近分类和纹理特征参数量化分析的瓷釉快速自动识别方案是可行的,且具有广泛的应用前景。

关键字 测量; 光学相干层析; 纹理分析; 数字图像分析; 瓷釉特征

中图分类号 TN247 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0508008

Research on Texture Characteristics Analysis of Ancient Glaze Optical Coherence Tomographic Image

Yan Xin¹ Dong Junqing¹ Liu Weidong^{1,2} Li Qinghui¹

¹Center of Sci-Tech Archaeology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²Wuhan East Feather Light Mechanical and Electrical Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430073, China

Abstract In order to quantify the structural characteristics of ancient porcelain glazes, seven texture characteristic parameters, which are used to describe the optical coherence tomographic (OCT) images of four typical plain enamel samples, are extracted based on image histogram and gray level co-occurrence matrix. The differences between the seven texture characteristic parameters of four kinds of glazes are obvious. The feasibility of glaze recognition scheme based on K-neighbor classification and quantitative analysis of texture feature parameters is certified by using an unknown sample. Experimental results show that seven characteristic parameters can characterize the glaze layer structure characteristics commendably. The glaze recognition scheme based on K-neighbor classification and quantitative analysis of texture feature parameters is feasible and promising.

Key words measurement; optical coherence tomography; texture analysis; digital image analysis; glaze characteristics

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,近年发展迅速,已逐渐被应用到古代壁画、油画、玉石以及古陶瓷的测试中^[1-17]。

OCT图像可以很好地反映瓷釉样品的釉层结构信息,为了能够实现基于机器视觉的瓷釉自动分类,需

收稿日期: 2014-11-14; 收到修改稿日期: 2015-01-04

基金资助: 国家 973 计划(2012CB720906、2012CB720901)、青年科学基金项目(51402326)、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方面的研究。E-mail: qinghui@sina.com(通信联系人)

要对这些结构信息进行量化,量化的实现可以通过提取纹理特征来进行。目前,OCT图像纹理分析在生物医学领域应用较多。瓷釉样品区别于生物组织,内部结构边缘模糊,图像的不确定性大,同时瓷釉的纹理属于既无方向性又无重复性的无序纹理,可基于不平整度来描述,用统计的方法比较合适。

为了实现基于OCT图像纹理特征参数定量分析进行不同瓷釉快速识别和分类,本文以未施加复杂装饰工艺的两种钧瓷和两种青瓷为例,采用纹理特征分析方法提取出瓷釉OCT图像中的7个特征参数,通过对这4种瓷釉的纹理特征参数进行量化分析和统计,同时利用K-邻近(KNN)算法并基于OCT图像纹理特征参数对不同瓷釉进行分类的可行性进行验证。

2 实 验

2.1 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的扫频OCT系统^[12],该系统主要由高速扫描激光光源(日本SANTEC公司的HSL激光器,中心波长为1320 nm,最大功率为50 mW)、干涉仪(日本SANTEC公司的IV-2000型)、扫描探针和计算机组成,在普通硅酸盐材料中纵向分辨率约5.3 μm。

2.2 样品信息

基于对河南、浙江等地多个窑址(如禹州钧台窑、汝州张公巷窑、巩义黄冶窑、宝丰清凉寺窑、汝州大峪东沟窑及龙泉窑等)出土的隋代至金代的大量瓷片的测试情况,以素面装饰的瓷釉为例,选取4片具有典型特征的不同种类的瓷片为代表,进行详细的图像纹理特征参数定量分析。样品如图1(a)~(d)所示,横线部分为测试区域,图内插图均为截面显微照片(由于照明原因,存在色差)。1、2号样品为郑州大学提供的钧釉瓷样品,其中1号样品釉层不透明,2号样品釉层较透明;3、4号样品为河南文物考古研究院提供的张公巷窑青瓷样品,3号样品釉层有乳浊效果,4号样品釉层较透明。样品具体信息如表1所示。

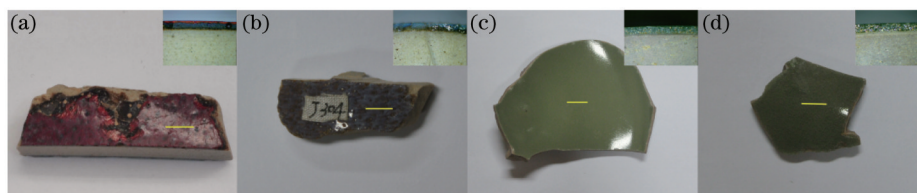


图1 陶瓷样品。(a) 1号;(b) 2号;(c) 3号;(d) 4号

Fig.1 Porcelain samples. (a) No.1; (b) No.2; (c) No.3; (d) No.4

表1 样品介绍

Table 1 Introduction of samples

Sample number	Type	Description
1	Jun porcelain	Song dynasty jun porcelain from Jun kiln in Yuzhou
2	Jun porcelain	Song dynasty jun porcelain from Jun kiln in Yuzhou
3	Celadon	Song and Jin dynasty celadon from Zhanggongxiang kiln in Ruzhou
4	Celadon	Song and Jin dynasty celadon from Zhanggongxiang kiln in Ruzhou

3 实验结果和分析

3.1 图像的预处理

OCT成像范围包含了探测器到样品表面的空气层、釉层以及瓷胎,为了较好地对釉层进行纹理分析,必须设定探测信号的上下限,并将釉层提取出来。实验中利用Matlab 2012 GUI对图像进行区域分割,步骤为:1) 设置统一的上、下信号强度限-5 dB~60 dB,将光谱强度信息矩阵映射到0~255的灰度等级中,转换为灰度图像 I_0 ; 2) 运用自适应阈值算法,将探测器到样品表面的空气层信息滤除(该空气层信号强度很小);3) 根据瓷釉表面信号纵向的突变提取出瓷釉表面的具体位置;4) 取一维纵向信号,根据信号的强度及衰减情况确定釉层厚度 d ; 5) 根据瓷釉表面的具体位置以及釉层厚度,在灰度图像 I_0 中提取相应的信号,分割出釉层图像。4个样品的灰度图像如图2所示,分割后得到的釉层图像如图3所示。图2、3中的1~4对应表1中的1~4号样品。

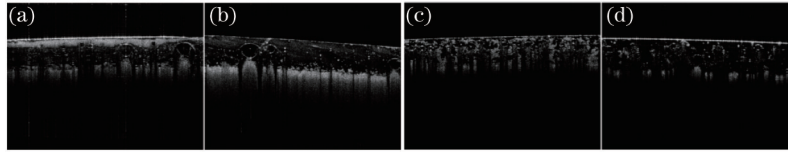


图2 4个样品的二维灰度图像。(a) 1号; (b) 2号; (c) 3号; (d) 4号

Fig.2 Two-dimensional grayscale images of 4 samples. (a) No.1; (b) No.2; (c) No.3; (d) No.4

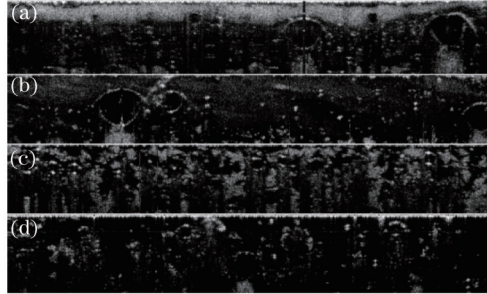


图3 预处理后得到的4个样品的釉层OCT图像。(a) 1号; (b) 2号; (c) 3号; (d) 4号

Fig.3 Glaze layer OCT images of 4 samples after pretreatment. (a) No.1; (b) No.2; (c) No.3; (d) No.4

3.2 纹理特征分析

3.2.1 基于灰度直方图的纹理分析

选取三个基于统计学灰度直方图一阶统计量(OCT图像的平均灰度 m 、OCT图像的灰度标准差 δ 及 OCT图像的熵 e)来描述瓷釉样品釉层结构信息。参数 m 可以反映材料对光的散射程度, m 越大, 其对光的散射强度越大; 参数 δ 可以反映整个 OCT 图像的粗糙度, 可用于描述样品内部结构的变化程度。 δ 越小, 图像越平滑, 图像的对比度越差, 灰度变化越缓慢; e 描述了图像灰度级信息的丰富程度, e 越大, 图像的灰度级越丰富, 纹理特征越丰富, 纹理信息越多。

$$m = \sum_{i=0}^{L-1} z_i \cdot p(z_i), \quad (1)$$

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^2 \cdot p(z_i)}, \quad (2)$$

$$e = -\sum_{i=0}^{L-1} p(z_i) \cdot \ln p(z_i), \quad (3)$$

式中 L 为灰度级总数, z_i 为第 i 个灰度级, $p(z_i)$ 为归一化直方图灰度级分布中灰度为 z_i 的概率。对图 4 中提取的 4 个釉层进行分析, 求各自特征参数 m 、 δ 、 e 的值, 结果如表 2 所示。可见 4 个样品由于釉层断面结构的差异, 其 OCT 图像的 3 个纹理统计特征参数差异明显, 1 号样品的 m 最大, 其纹理信息最丰富, 对应于釉层对光的散射强度最大, 其液液相层折射率差异很大, 4 号样品的 m 最小, 其纹理信息最少, 不存在液液相, 除气泡及少量析晶之外, 釉层均匀, 散射强度很微弱; 1 号样品的 δ 最大, 其图像灰度的变化较快, 对应釉层的结构变化较快速, 2 号样品 δ 最小, 其变化较小, 对应其釉层的结构变化较慢; 1 号样品 e 最大, 釉层灰度级最丰富, 对应着不同等级的散射强度, 釉层的层次比较丰富, 4 号样品 e 最小, 灰度级最单调, 对应釉层的层次就相对单一。

表2 3个特征参数的计算结果

Table 2 Calculation results of three characteristic parameters

Sample number	1	2	3	4
m	48.99	21.82	33.03	15.14
δ	58.49	30.86	41.13	38.39
e	6.00	4.81	5.30	2.84

3.2.2 基于灰度共生矩阵的纹理分析

灰度直方图是一种描述单个像素灰度分布的一阶统计量, 在区分纹理结构的变化方面存在明显劣势。为了弥补这一劣势, 引入灰度共生矩阵来描述具有某种空间位置关系的两个像素的联合分布。灰度共生矩

阵 \mathbf{P} 中元素可定义为^[13]

$$p(g_1, g_2) = \frac{\#\{(x_1, y_1), (x_2, y_2) \in S | f(x_1, y_1) = g_1 \ \& \ f(x_2, y_2) = g_2\}}{\#S}, \quad (4)$$

式中 $\#$ 代表求元素的个数, S 为目标区域中具有某种特定空间联系的像素对的集合, g_1, g_2 为灰度值, $f(x_1, y_1), f(x_2, y_2)$ 为目标区域中 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 点的灰度, 这样得到的矩阵 \mathbf{P} 是归一化的。

实验中样品的灰度共生矩阵如图 4 所示(像素对之间的空间关系: 向右一个像素, 向下一个像素^[14]), 对瓷釉的 OCT 图像而言, 其纹理相对比较粗, 灰度在空间上变化较慢, 像素对具有相近的灰度值, 因此灰度共生矩阵中元素值大部分分布在主对角线周围。可以看到, 1 号样品中存在明显的液液相以及均匀相, 且液液相散射较强, 故共生矩阵中的元素会在低灰度等级区域和高灰度等级区域产生两个中心; 2 号样品也存在明显的液液相以及均匀相, 但是液液相散射较弱, 对应的灰度等级较低, 故共生矩阵中的元素集中在较低灰度区域; 3 号样品中存在均匀的玻璃相以及零散分布的液液相, 灰度在空间变化上相对稍快, 其共生矩阵中的元素分布在对角线方向上有一定的展宽, 分布在低灰度级到较高灰度级之间, 在零灰度级及其附近, 有一个元素聚集中心; 4 号样品釉层中仅有均匀的玻璃相, 整体灰度很低, 其共生矩阵中的元素集中在零级灰度及附近的低灰度区域。

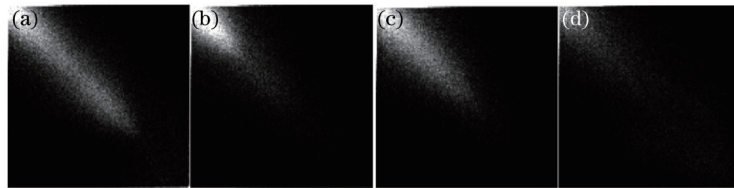


图 4 4 个样品的灰度共生矩阵。(a) 1 号; (b) 2 号; (c) 3 号; (d) 4 号

Fig.4 Gray co-occurrence matrices of 4 samples. (a) No.1; (b) No.2; (c) No.3; (d) No.4

基于灰度共生矩阵, 引入纹理二阶矩 W_M 、熵 W_E 、对比度 W_C 以及均匀性 W_H 4 个常用纹理描述符。 W_M 对应图像的均匀性或平滑性, W_M 越小, 图像的平滑性越差; W_E 为图像内容随机性的度量, W_E 越大, 图像包含的信息量越大; W_C 为灰度共生矩阵灰度差的一阶矩, 对应图像中灰度的突变, 可以用来描述图像中异常散射的强弱, W_C 较小, 说明图像灰度变化较缓, W_C 较大, 说明图像中存在灰度突变; W_H 为均匀性, 一定程度上可视为 W_C 的倒数, 元素分布越接近主对角线, W_H 越大, 图像灰度分布越均匀。

$$W_M = \sum_{g_1} \sum_{g_2} p_2(g_1, g_2), \quad (5)$$

$$W_E = \sum_{g_1} \sum_{g_2} p(g_1, g_2) \lg p(g_1, g_2), \quad (6)$$

$$W_C = \sum_{g_1} \sum_{g_2} |g_1 - g_2| \cdot p(g_1, g_2), \quad (7)$$

$$W_H = \sum_{g_1} \sum_{g_2} \frac{p(g_1, g_2)}{k + |g_1 - g_2|}, \quad (8)$$

式中 k 为常数, 主要用来避免分母为 0, 取 0.06 为宜。

对 4 个样品进行测试的结果如表 3 所示, 由于釉层结构的差异, W_M, W_E, W_C 以及 W_H 4 个特征参数的差异明显。1 号样品的 W_M 最小, 其图像的平滑性最差, 对应于釉层中的液液相^[10]及均匀相的变化。4 号样品的 W_M 最大, 图像平滑性最好, 对应于釉层中的单一的均匀玻璃相; 1 号样品的 W_E 最大, 图像中的信息最多, 即釉层中气泡、液液相、析晶越多。4 号样品的 W_E 最小, 图像中的信息最少, 对应于釉层中的气泡、液液相或析晶最少; 1、3 号样品的 W_C 较大, 其结构中存在亮度较高的液液相, 对应灰度变化较快。2 号样品的 W_C 的最小, 其釉层中是均匀的玻璃相, 对光的散射最少, 亮度较暗, 层次变化较缓; 4 号样品的 W_H 最大, 其灰度共生矩阵中的元素越靠近对角线分布, 且比较集中, 对应 OCT 图像越均匀, 釉层也就越均匀。1 号样品的 W_H 最小, 其灰度共生矩阵沿对角线分布的范围最大, 对应 OCT 图像层次多变, 釉层相对不均匀。

可以看到, 上述 4 个样品的 7 个 OCT 图像统计特征参数差异明显。上述 7 个特征参数可以很好且比较直观地表征瓷釉的纹理结构特征, 因此基于这些特征参数, 可以构造一个 7 维的特征向量, 建立一个 7 维的瓷釉

表3 特征参数的计算结果

Table 3 Calculation results of characteristic parameters

Sample number	1	2	3	4
W_M	0.05	0.09	0.08	0.40
W_E	6.52	5.37	5.99	3.43
W_C	8.25	6.81	8.36	7.99
$W_H(k=0.06)$	4.28	5.50	5.05	10.75

OCT图像断面特征向量库,结合统计分类的K-邻近算法进行瓷釉的自动分类识别。

3.3 基于7个特征参数的瓷釉分类思想

纹理分析的目的是为了寻找一组特征量来描述瓷釉样品,并且这组特征量可以作为区分不同瓷釉样品的依据。实验选取未施加复杂装饰工艺的透明青瓷、半乳浊青瓷、透明钧瓷及不透明钧瓷4类样本,分别记为A、B、C、D,每类样本为20个OCT釉层图像,以说明基于纹理特征参数分类的可行性。

现有未知样品X、Y如图5所示,采用上述7个特征参数,基于K-邻近法,与已知的瓷釉样品纹理特征参数进行比较,实现瓷釉的自动分类。K-邻近算法的思想^[14]为:如果一个样本在特征空间中的k个最相似(即特征空间中最邻近)的样本中的大多数属于某一个类别,则该样本也属于这个类别。KNN的决策函数为

$$d_i = \sqrt{\sum_j (v_j^i - v_j^s)^2}, \quad (9)$$

式中 $j=1,2,\dots,7$ 分别对应 $m, \delta, e, W_M, W_E, W_C$ 以及 W_H 7个特征参数, $i=1,2,3,4$ 分别对应A、B、C、D4类样本, v_j^i 为4个样本7个特征参数的平均值的归一化结果, v_j^s 为未知样品的特征参数的归一化结果。

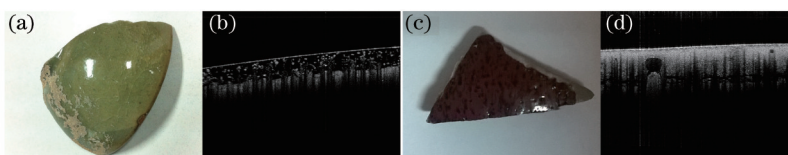


图5 (a) 未知样品X; (b) X的OCT图像; (c) 未知样品Y; (d) Y的OCT图像

Fig.5 (a) Unknown sample X; (b) OCT image of X; (c) unknown sample Y; (d) OCT image of Y

计算4类样本的7个特征参数,基于统计产品与服务解决方案(SPSS)软件统计各类样本的特征参数的均值并进行归一化处理,以方便邻近法分类决策函数的计算,各个特征参数的平均结果如表4所示,括号中为归一化结果。未知样品特征参数结果如表5所示,括号中为归一化结果。

表4 样本测试结果

Table 4 Test results of samples

	A	B	C	D
m	15.00(0)	37.51(0.44)	25.32(0.20)	66.02(1)
δ	34.66(0)	42.24(0.38)	35.40(0.04)	54.87(1)
e	2.82(0)	5.69(0.75)	4.90(0.54)	6.65(1)
W_E	3.04(0)	6.39(0.68)	5.42(0.48)	7.43(1)
W_M	0.44(1)	0.05(0.07)	0.10(0.19)	0.02(0)
W_C	4.10(0)	9.19(0.90)	6.91(0.50)	9.74(1)
$W_H(k=0.06)$	11.13(1)	4.19(0.17)	5.68(0.34)	2.75(0)

表5 X和Y的测试结果

Table 5 Test result of X and Y

	m	δ	e	W_E	W_M	W_C	$W_H(k=0.06)$
X	15.94(0.02)	39.58(0.30)	3.06(0.06)	3.73(0.16)	0.38(0.86)	4.87(0.14)	10.47(0.90)
Y	65.31(0.99)	58.45(1)	6.71(1)	7.34(1)	0.03(0.02)	9.10(0.88)	3.19(0.05)

根据(9)式计算得到X样品的 $d_1=0.41, d_2=1.63, d_3=1.15, d_4=2.31$,此样品与A类纹理特征参数的欧几里德距

离最短,系统将X定为A类样品;Y样品的 $d_1=2.57, d_2=1.17, d_3=1.51, d_4=0.13$,此样品与D类纹理特征参数的欧几里德距离最短,系统将Y定为D类样品,与实际情况相符合。说明基于OCT图像纹理特征参数的定量分析,对快速识别不同类别的古代瓷釉具有可行性和广阔的应用前景。

考虑到中国古代瓷釉的种类繁多,相同釉系的釉层也会出现不同的瓷釉结构特征,加上古代制瓷工艺的限制、年代的变化以及地域变化,釉层存在很强的不确定性,在对基于素面装饰的瓷釉OCT纹理特征参数KNN算法定量分析的基础上,逐步考虑对施加釉上彩、釉下彩、刻花及剔花等装饰工艺瓷釉进行更深入的研究,以丰富和完善纹理特征参数计算方法,实现对不同瓷釉的精确分类。需要建立一个庞大的OCT瓷釉数据库,在不同种大类的条件下,细化分类(如依据年代、窑口),建立一个金字塔模型。补充一些纹理特征以外的特征参数(如气泡的大小、分布密度、析晶的分布、装饰风格),根据瓷釉差异的具体情况进行参数加权,在金字塔模型各个层次中进行KNN邻近。

4 结 论

实验在对大量古代不同类型瓷釉进行了OCT成像分析基础上,以素面瓷釉为例,选取4种具有典型特征的古代瓷釉样品,对其OCT图像进行了釉层分割,进而对分割后的釉层图像进行了特征提取,提出了用7个纹理特征参数来描述瓷釉的结构特征,并基于这7个纹理特征参数,提出了KNN的瓷釉分类方法。将未知样品与4种不同类别瓷釉的7个纹理特征参数进行对比,验证了KNN的瓷釉种类的识别与分类的可行性。通过数据库的不断积累、纹理特征参数算法的优化,建立一个全面的OCT图形纹理特征分析体系对研究古代瓷釉的时空特征具有重要的意义和广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 D Huang, E A Swanson, C P Lin, *et al.*. Optical coherence tomography[J]. Science, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- 2 Brett E Bouma, Guillermo J Tearney. Handbook of Optical Coherence Tomography[M]. New York: Marcel Dekker, Inc, 2002.
- 3 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.
- 4 Meng Zhuo, X Steve Yao, 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.
- 5 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.
- 6 P Targowski, M Iwanicka, M Sylwestrzak, *et al.*. OCT structural examination of 'Madonna dei Fusi' by Leonardo da Vinci[C]. SPIE, 2013, 8790: 87900N.
- 7 Haida Liang, B Peric, M Hughes, *et al.*. Optical coherence tomography for art conservation & archaeology[C]. SPIE, 2007, 6618: 661805.
- 8 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.
- 9 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.
- 10 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.
- 11 Yang M L, Winkler A M, Klein J. 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.
- 12 Yan Xin, Dong Junqing, Li Qinghui, *et al.*. Preliminary research in section structure characteristics of ancient glaze base 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.
- 13 Zhang Yujin. Image Engineering (Second Edition)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.

- 张毓晋. 图像工程(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- 14 Xu Peng. Research on the Optical Coherence Tomography for Nondestructive Testing of Ancient Jades[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- 许 鹏. 光学相干层析成像用于古代玉器无损检测技术的研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2011.
- 15 Li Jianghua, Huang Hai, Tang Zhilie, *et al.*. Measurement of enamel mineral density by optical coherence tomography[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0817001.
- 李江华, 黄 海, 唐志列, 等. 光学相干层析成像对牙釉质矿密度的定量测量[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0817001.
- 16 Su Ya, Meng Zhuo, Wang Zhilong, *et al.*. Correlation analysis and calibration of noninvasive blood glucose monitoring in vivo with optical coherence tomography[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0704002.
- 苏 亚, 孟 卓, 王志龙, 等. 光学相干层析无创血糖检测中相关性分析及标定[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0704002.
- 17 Ding Zhihua, Zhao Chen, Bao Wen, *et al.*. Advances in Doppler optical coherence tomography[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080005.
- 丁志华, 赵 晨, 鲍 文, 等. 多普勒光学相干层析成像研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080005.

栏目编辑: 何卓铭