

## 应用 OCT 成像技术对海水珍珠的无损测量研究

董俊卿<sup>1,2</sup>, 李青会<sup>1</sup>

(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)

**摘要:** 为探明两种不同大小的海水珍珠的内部结构差异, 利用一种新型扫频光学相干层析(OCT)成像系统和 Raman 光谱仪, 无损分析了中国南珠和南洋珠两类海水珍珠。Raman 光谱分析表明, 这批海水珍珠主体物相皆为文石, 未检测到人工有机染色物和添加物。基于该 OCT 成像系统的测量和图形处理功能, 对这批海水珍珠珠层厚度进行了快速、有效的测量, 并根据珠层厚度, 将其质量等级分成五等。对比分析了这批海水珍珠样品的厚度与直径, 除少数样品外, 这批海水珠层厚度与珍珠直径呈弱正相关。此外, 通过 OCT 二维图像的纹理特征, 对这批海水珍珠的珍珠层、过渡层、珠核层组织的均匀性等进行了归类和评估。OCT 成像技术可为珍珠的珠层厚度和均匀性质量分级提供重要依据。

**关键词:** 光学相干层析成像; 海水珍珠; 珠层厚度; 纹理特征; 质量分级

**中图分类号:** TN27; O433.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0417004

## Research on nondestructive measurement of sea pearls using optical coherence tomography technique

Dong Junqing<sup>1,2</sup>, Li Qinghui<sup>1</sup>

(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)

**Abstract:** To ascertain the inner structure diversity of the two different size sea pearls, some sea pearls including south pearls of China and south sea pearls were non-destructively analyzed by a new swept-source optical coherence tomography (OCT) technique and Raman spectroscopy. The Raman spectrum analysis results indicate that the phases of the nacre of all sea pearls are aragonite. Any artificial organic dye and additive were not found. The nacre thicknesses were speedily and effectively determined based on the measuring function and graph manipulation function of this OCT technique. On the basis of the nacre thickness data, these sea pearls can be classified into five grades. The thickness and the diameter of the pearls were comparatively studied. The thicknesses of most of sea pearls have weak positive correlation with the diameters except several ones. In addition, according to the texture characteristics of OCT 2D images, the quality uniformity of nacre, transition layer and nucleus were classified and evaluated. The OCT technique could provide significant evidence for grade classification for nacre thickness and quality uniformity of pearls.

**Key words:** optical coherence tomography; sea pearl; nacre thickness; texture characteristic; quality grade

收稿日期: 2017-11-10; 修订日期: 2017-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(11374314, 51402326)

作者简介: 董俊卿(1980-), 男, 助理研究员, 博士生, 主要从事宝玉石器、陶瓷、玻璃等材料的光学与光谱学方面的研究。

Email: djqing@siom.ac.cn

导师简介: 李青会(1973-), 研究员, 博士, 主要从事古代材料的光学与光谱学研究。

## 0 引言

珍珠是一种在珍珠贝类和珠母贝类软体动物体内孕育的生物,是一种生物有机宝石。按照生长水域不同,分为海水珍珠和淡水珍珠,又称南珠和北珠,两者的区别主要在生长的水域和珠核的有无两个方面,前者有核,而后者无核。目前市面上的珍珠绝大多数都属于养殖珍珠,天然珍珠数量极少。自古就有“西珠不如东珠,东珠不如南珠”的说法,西珠指的是古代产自波斯湾和斯里兰卡一带的珍珠,东珠指的是古代产自日本的珍珠,而南珠是指产自我国古合浦郡由马氏珠母贝孕育的天然海水珍珠<sup>[1]</sup>。中国海洋养殖珍珠主要产于广东雷州半岛、广西沿海和海南省,称中国南珠。中国南珠以其玲珑雅致、色泽艳丽,在国际装饰品和名贵中药材市场上享有盛誉。世界上流行的海水养殖珍珠主要为阿古屋贝(Akoya)珍珠(养殖于日本和中国海域并由阿古屋贝所产)、南洋(South Sea)珍珠(主要养殖于澳大利亚、印度尼西亚和菲律宾等国海域并由大珠母贝所产)和大溪地(Tahitian)珍珠(主要养殖于南太平洋的法属波利尼西亚群岛并由黑唇珠母贝所产)。澳大利亚现在是世界上白色南洋珠的最大生产国<sup>[2]</sup>。

光学相干层析(OCT)成像技术是近年来发展较快的一种新型亚表面纵剖面分析技术,以其分辨率高、非接触无损伤、实时快捷和灵敏度高等优点,已经广泛应用于生物医学<sup>[3-4]</sup>、测量<sup>[5]</sup>、薄膜、材料检测、玉石<sup>[6]</sup>和玉器<sup>[7]</sup>、古陶瓷<sup>[8-12]</sup>、壁画<sup>[13]</sup>及古代艺术品<sup>[14]</sup>等研究领域。OCT成像技术通过探测珍珠质的光学反射散射特征来研究其微观结构形态和分布规律,可以评估珍珠内部组织的均匀性和透明度。因无需切割珍珠且方便快捷,OCT成像技术在珍珠质的定量测量和分析其内部微观组织结构方面具有突出优势,在珍珠的科学研究中也得到了成功的应用<sup>[15-16]</sup>,如可以鉴别真假珍珠、定量测量珍珠层的厚度、评估珍珠的质量以及区分淡水无核珍珠与海水有核珍珠等。珍珠的珠层厚度是衡量珍珠质量的一个重要指标,而准确定量测量珠层厚度的难度相对较高,以往主要通过比较法、X射线照相法和直接测量法来测量珍珠珠层的厚度,这些方法不仅费时,而且后两种方法对人体或珍珠都有损害。近年

来,鉴于OCT在珍珠珠层厚度无损测量方面的独特优势,国家质检总局已于2009年将OCT列为珍珠珠层厚度测量的基本方法(《GB/T 23886-2009,珍珠珠层厚度测定方法 OCT法》)<sup>[17]</sup>。Koozekanani<sup>[18]</sup>、Gilboa<sup>[19]</sup>、Fernandez<sup>[20]</sup>、Baroni<sup>[21]</sup>及陈俊红<sup>[22]</sup>等在图像处理 and 纹理分析的基础上针对珍珠层厚度自动测量分析进行过算法和图形处理方面的有益探索和尝试,但要求操作者有较强的光学和图像处理专业知识。

该实验采用新型扫频OCT系统的测量和图像处理功能,无需复杂处理,直接对一批海水珍珠的珠层度进行快速无损测量,并通过纹理特征对其均匀性和质量等级等进行分析研究。

## 1 实验部分

### 1.1 仪器

#### 1.1.1 可移动式 LabRAMXploRA 型共焦激光显微拉曼光谱仪

拉曼光谱分析采用法国 Horiba 公司生产的可移动式 LabRAMXploRA 型共焦激光显微拉曼光谱仪,配有高稳定性研究级显微镜及反射及透射柯勒照明,物镜包括 5×、10×、100×和 LWD50×。内置 532 nm 高稳定固体激光器(额定功率:25 mW)、785 nm(额定功率:90 mW)高稳定固体激光器以及相应的滤光片组件,全自动切换激发波长,计算机控制多级激光功率衰减片。采用针孔共焦技术,与 100×物镜配合,空间分辨率横向优于 1 μm,纵向优于 2 μm。光谱仪拉曼频移范围:532 nm 激发时为 70~8 000 cm<sup>-1</sup>,785 nm 激发时为 150~3 100 cm<sup>-1</sup>;光谱分辨率≤2 cm<sup>-1</sup>;内置四块光栅(2 400、1 800、1 200、600 gr/mm),光谱重复性≤±0.2 cm<sup>-1</sup>。每次测定样品前均采用单晶 Si 标样分别对激光拉曼光谱进行校正。

#### 1.1.2 扫频 OCT 系统

采用的扫频 OCT 系统主要由 4 部分构成:扫频源、干涉仪单元、OCT 探针以及计算机单元。扫频源部分采用的是 HSL-2000 型扫频激光光源(日本 Santec 公司),其中心波长为 1 310 nm,谱峰半高宽为 110 nm,扫频频率为 20 kHz,最大功率为 50 mW。图像分辨率可达微米量级,干涉仪单元则基于延迟线集成的马赫-泽德干涉系统<sup>[23]</sup>。

1.2 样品

样品皆为海水养殖珍珠, 其中中国南珠 34 颗, 南洋珠 3 颗, 多为白色、浅黄白色, 个别银色、银白色或金黄色, 参考中华人民共和国国家标准《GB/T 18781-2008 珍珠分级》<sup>[24]</sup>对海水珍珠形状的划分标

准, 对这批海水珍珠的直径、形状和质量分级做了详细的描述(见表 1)。中国南珠的直径和厚度变化范围都比较大, 直径约 5~9 mm, 厚度约 0.1~8 mm。南洋珠的直径和厚度一般大于中国南珠, 直径皆大于 8 mm, 厚度皆大于 0.9 mm。

表 1 海水珍珠样品目录

Tab.1 Catalogue of sea pearls

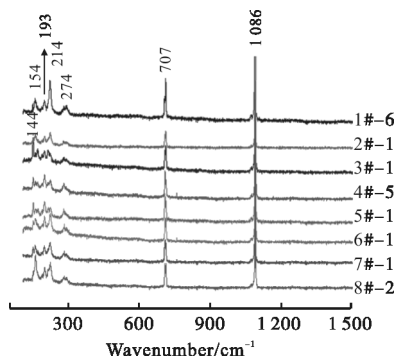
No.	Category	Color	Diameter /mm	Minimum diameter /mm	Maximum diameter /mm	Diameter difference/mm	Diameter difference percentage	Shape	Shape grade
1#-1	spC*	White-yellow	5.80	5.80	5.92	0.12	2.0%	Circular	A2
1#-2	spC	White-yellow	5.50	5.50	5.55	0.05	0.9%	Standard	A1
1#-3	spC	Silvery	5.40	5.40	5.51	0.11	2.0%	Circular	A2
1#-4	spC	White-yellow	5.64	5.64	5.72	0.08	1.4%	Circular	A2
1#-5	spC	White-yellow	5.60	5.60	5.73	0.13	2.3%	Circular	A2
1#-6	spC	White-yellow	5.69	5.69	5.75	0.06	1.0%	Standard	A1
2#-1	spC	White	6.43	6.43	6.46	0.03	0.5%	Standard	A1
2#-2	spC	White	6.22	6.22	6.27	0.05	0.8%	Standard	A1
2#-3	spC	White	6.08	6.08	6.11	0.03	0.5%	Standard	A1
2#-4	spC	White	6.14	6.14	6.21	0.07	1.1%	Circular	A2
2#-5	spC	Golden yellow	6.40	6.40	6.66	0.26	4.0%	Circular	A2
2#-6	spC	White-yellow	6.49	6.49	6.53	0.04	0.6%	Standard	A1
3#-1	spC	Silvery white	7.14	7.14	7.18	0.04	0.6%	Standard	A1
3#-2	spC	Silvery white	6.71	6.71	6.85	0.14	2.1%	Circular	A2
3#-3	spC	Golden	6.59	6.59	6.70	0.11	1.7%	Circular	A2
3#-4	spC	Light yellow	6.88	6.88	7.10	0.22	3.1%	Circular	A2
3#-5	spC	White	6.92	6.92	7.02	0.10	1.4%	Circular	A2
3#-6	spC	White	6.89	6.89	6.96	0.07	1.0%	Standard	A1
4#-1	spC	Golden yellow	7.36	7.36	7.41	0.05	0.7%	Standard	A1
4#-2	spC	Light yellow	7.49	7.49	7.51	0.02	0.3%	Standard	A1
4#-3	spC	White	7.33	7.33	7.41	0.08	1.1%	Round	A2
4#-4	spC	White	7.44	7.44	7.46	0.02	0.3%	Standard	A1
4#-5	spC	White	7.01	7.01	7.05	0.04	0.6%	Standard	A1
4#-6	spC	White	7.09	7.09	7.14	0.05	0.7%	Standard	A1
5#-1	spC	Silvery white	7.39	7.39	7.58	0.19	2.5%	Circular	A2
5#-2	spC	White	7.40	7.40	7.51	0.11	1.5%	Circular	A2
5#-3	spC	White	7.81	7.81	7.92	0.11	1.4%	Circular	A2
5#-4	spC	White	7.75	7.75	7.92	0.17	2.2%	Circular	A2
6#-1	spC	White	8.07	8.07	8.15	0.08	1.0%	Standard	A1
6#-2	spC	White	8.00	8.00	8.05	0.05	0.6%	Standard	A1
7#-1	spC	White	8.95	8.95	9.00	0.05	0.6%	Standard	A1
7#-2	spC	White	8.93	8.93	9.03	0.10	1.1%	Circular	A2
8#-1	spC	White	9.16	9.16	9.22	0.06	0.7%	Standard	A1
8#-2	spC	White	8.98	8.98	9.05	0.07	0.8%	Standard	A1
9#	ssp	Silver gray	8.66	8.66	8.76	0.10	1.1%	Circular	A2
10#-1	ssp	White	9.53×10.39	9.53	10.39	0.86	8.6%	Suborbic-	A3
10#-2	ssp	Light yellow	9.60×10.56	9.60	10.56	0.96	9.5%	Suborbic-	A3

\*spC: south pearls of China; ssp: south sea pearls

## 2 结果与讨论

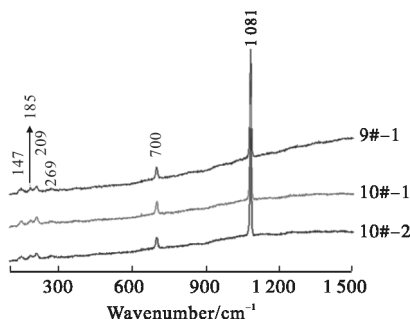
### 2.1 激光共焦拉曼光谱分析结果

珍珠的主要组分包括无机和有机两部分,以无机组分为主,即珍珠质和水,珍珠质主要以文石( $\text{CaCO}_3$ )微晶形式存在,约占90%。有机组分包括壳角蛋白和各种色素等,约占5%,存在于文石晶体间<sup>[25]</sup>。首先采用激光共焦显微拉曼光谱仪对这批海水珍珠的物相结构进行了无损分析,中国南珠样品在532 nm激发波长激发下,荧光背景较强,采用785 nm激发波长激发时获得了较理想的拉曼振动峰,其主要拉曼峰在144、154、193、214、274、707、1 086  $\text{cm}^{-1}$ 附近(代表性图谱见图1(a));而南洋珠样品则在532 nm激发波长激发下检测到较理想的拉曼振动峰,147、185、209、289、700、1 081  $\text{cm}^{-1}$ 附近(见图1(b)),与中国南珠存在细微差别,初步推测可能与不同的激发波长、仪器的系统误差有一定关系,此外还可能与两类珍珠所生长的水域环境有关,不



(a) 中国南珠,785 nm 激发波长

(a) South pearls of China, 785 nm



(b) 南洋珠,532 nm 激发波长

(b) South sea pearls, 532 nm

图1 海水珍珠典型拉曼图谱

Fig.1 Typical Raman spectra of sea pearls

同的水域环境及其养殖方式可能对珍珠的结构产生一定的影响,具体原因尚需进一步分析。上述这些振动峰皆属于文石的拉曼特征峰,其中最强峰1 081  $\text{cm}^{-1}$ 和1 086  $\text{cm}^{-1}$ 归属于 $[\text{CO}_3^{2-}]$ 阴离子团对称伸缩振动 $\nu_1$ 引起的,位于700  $\text{cm}^{-1}$ 和707  $\text{cm}^{-1}$ 附近,是由 $[\text{CO}_3^{2-}]$ 阴离子团的反对称弯曲振动 $\nu_4$ 引起,在144~289  $\text{cm}^{-1}$ 的谱峰归属于文石的晶格振动峰<sup>[26]</sup>。实验未检测出有机染料及其他人工材料的拉曼峰,说明这批珍珠未经人工染色和处理,系真珍珠。

### 2.2 基于珍珠 OCT 二维图像的珠层厚度测量

#### 2.2.1 珍珠层测量

为获取理想的 OCT 二维图像信息,二维扫描时针对具体样品情况设定测量具体参数,根据珍珠的直径,横向扫描范围设定范围为2~10 mm,积分次数为4,输出图像分大小为1 000 pixel×750 pixel。珍珠的折射率为1.500~1.685,多为1.53~1.56,实验测量时取折射率为1.55。

珍珠中水的存在影响着珍珠层中文石晶体与有机质的排列,珍珠的结构类似于同心圆的层状结构<sup>[27]</sup>。OCT 二维图像可以清晰地反映珍珠的内部层次结构,如图2所示,两条白色亮线之间为珍珠层的厚度,珍珠层一般半透明,对光均匀的弱散射相。中间一条粗的白色散射相层为过渡层,过渡层对光散射较强。过渡层下面是珍珠核,由于过渡层的散射,珍珠核层的信号较弱。由于不同样品的光泽度、形状、均匀性等不同,获取的 OCT 二维图像中存在噪声和强散射信号干扰,测量过程中对二维图形进行去噪、锐化、局部放大等简单的图形处理,以突出珍珠层上下两个界面,分别以中国南珠样品3#-5(见图3)和南洋珠9#及10#-2(见图4)为例,进行说明。

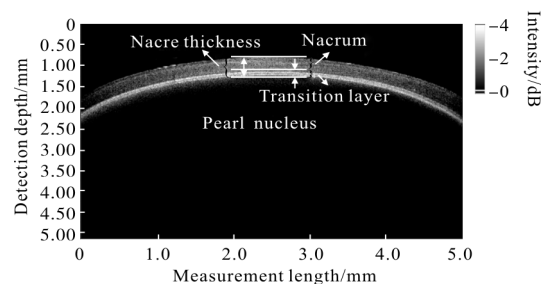
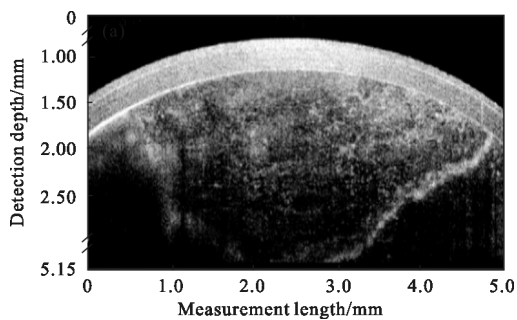


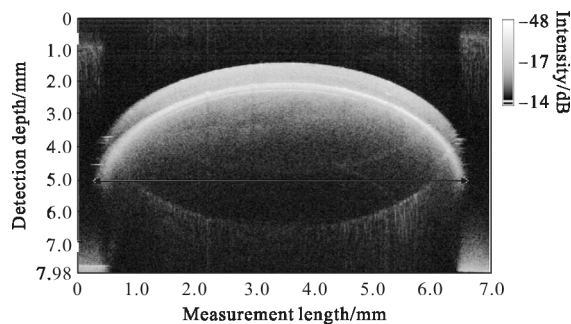
图2 海水珍珠内部结构 OCT 图像(中国南珠样品1#-1)

Fig.2 OCT images of inner structure of sea pearls

(sample 1#-1 of south pearls of China)



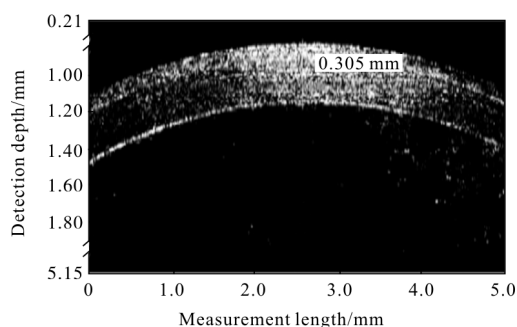
(a) 样品 3#-5 测试区域 1 的 OCT 二维图像  
 (a) The first test areas OCT 2D images of sample 3#-5



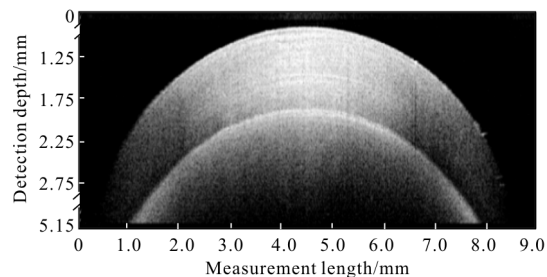
(e) 珍珠样品 OCT 直径测量示意图  
 (e) Images of pearl diameter measured by OCT

图 3 中国南珠样品的 OCT 二维图像

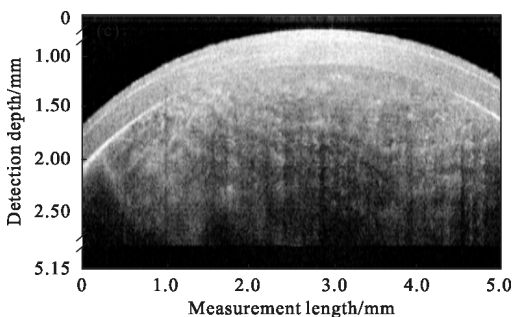
Fig.3 OCT 2D images of south pearls of China



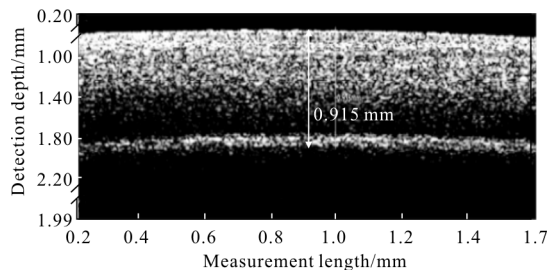
(b) 去噪、锐化、局部放大后的测量图像  
 (b) Measuring images by denoised, sharpen and partial enlarged



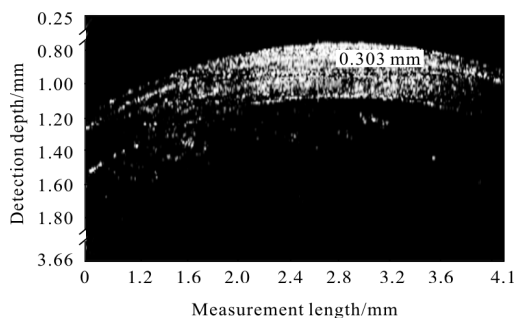
(a) 9# 测试区域 4 和 10#-2 测试区域 4 的 OCT 二维图像  
 (a) OCT 2D image the fourth test area of sample 9# and the fourth test area of sample 10#-2



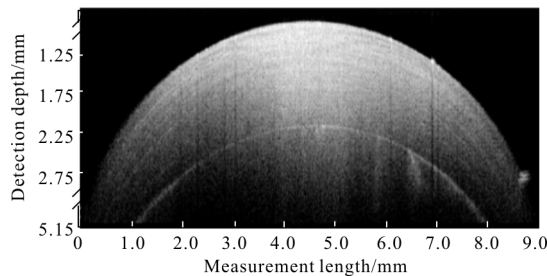
(c) 样品 3#-5 测试区域 2 的 OCT 二维图像  
 (c) The second test areas OCT 2D images of sample 3#-5



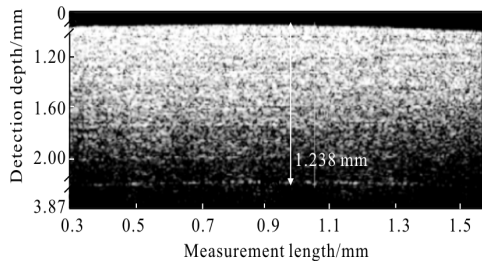
(b) 去噪、锐化、局部放大后的测量图像  
 (b) Measuring images by denoised, sharpen and partial enlarged



(d) 去噪、锐化、局部放大后的测量图像  
 (d) Measuring images by denoised, sharpen and partial enlarged



(c) 9# 测试区域 4 和 10#-2 测试区域 4 的 OCT 二维图像  
 (c) OCT 2D image(the fourth test area of sample 9# and the fourth test area of sample 10#-2)



(d) 去噪、锐化、局部放大后的测量图像

(d) Measuring images by denoised, sharpen and partial enlarged

图 4 南洋珠样品的 OCT 二维图像

Fig.4 OCT 2D images of south sea pearls

由于获取珍珠珠层的真实厚度时需要将其切开

进行测量,这将使珍珠受到破坏,而通过 OCT 成像分析可以对珍珠的直径进行直接测量,为了在不损伤珍珠样品的情况下验证测量珍珠层厚度测量的准确性,先选取若干不同类别和大小的珍珠样品进行 OCT 直径测量(结果见表 2),然后将测量结果与表 1 中用游标卡尺直接测量的结果进行对比,通过公式: $Er=(d_o-d_R)/(d_R/100)$  计算测量误差(其中  $Er$  表示相对误差,  $d_R$  表示用游标卡尺测量的真实值,  $d_o$  表示 OCT 的测量值)。由表 2 可知,测量误差在  $\pm 3\%$  以内,说明 OCT 测量珍珠直径和厚度是可行的。

表 2 珍珠样品直径的 OCT 测量误差

Tab.2 Diameter relative error of the pearl samples measured by OCT

No.	$d_R/mm$	$d_o/mm$	$Er$	No.	$d_R/mm$	$d_o/mm$	$Er$
1#-1	5.80	5.82	+0.41%	4#-1	7.36	7.30	-0.87%
1#-2	5.50	5.34	-2.84%	4#-2	7.49	7.44	-0.73%
1#-3	5.40	5.34	-1.04%	4#-3	7.33	7.30	-0.46%
1#-4	5.64	5.57	-1.28%	4#-4	7.44	7.41	-0.36%
1#-5	5.60	5.49	-2.00%	4#-5	7.01	6.99	-0.33%
1#-6	5.69	5.57	-2.07%	4#-6	7.09	7.07	-0.25%
2#-1	6.43	6.37	-1.01%	5#-1	7.39	7.36	-0.46%
2#-2	6.22	6.23	+0.08%	5#-2	7.40	7.37	-0.43%
2#-3	6.08	6.01	-1.13%	5#-3	7.81	7.70	-1.36%
2#-4	6.14	6.17	+0.47%	5#-4	7.75	7.60	-2.00%
2#-5	6.40	6.50	+1.50%	6#-1	8.07	8.06	-0.15%
2#-6	6.49	6.47	-0.34%	6#-2	8.00	7.86	-1.75%
3#-1	7.14	7.14	-0.06%	7#-1	8.95	8.82	-1.45%
3#-2	6.71	6.73	+0.31%	7#-2	8.93	8.92	-0.11%
3#-3	6.59	6.58	-0.14%	8#-1	9.16	9.03	-1.45%
3#-4	6.88	6.88	0.00%	8#-2	8.98	8.88	-1.11%
3#-5	6.92	6.89	-0.43%	9#	8.66	8.51	-1.77%
3#-6	6.89	6.88	-0.15%				

Note:  $d_R$ : diameters measured by vernier calipers;  $d_o$ : diameters measured by OCT;  $Er$ : relative error

2.2.2 珍珠珠层的厚度

考虑到珍珠样品的圆度和珍珠层均匀性的差异,实验过程中对珍珠样品采取多方向多次测量,对形状类别为 A1 型正圆形和 A2 型圆形的每个样

品取 5~8 个数据点,对 A3 型近圆形的取 9~12 个测试点,最后取平均值。珍珠层厚度测量结果见表 3。

根据表 3 的测试结果,将这些海水珍珠珠层的平均厚度和直径一起做成散点图,示于图 5。总体

表 3 海水珍珠样品的 OCT 平均厚度测量结果及质量等级

Tab.3 Results of mean thickness and quality grade of sea pearls by OCT

No.	Mean thickness/mm	Measurement points/mm	Quality grade	No.	Mean thickness/mm	Measurement points/mm	Quality grade
1#-1	0.38	5	D	4#-2	0.30	8	D
1#-2	0.15	7	E	4#-3	0.44	6	C
1#-3	0.29	6	E	4#-4	0.44	6	C
1#-4	0.37	8	D	4#-5	0.54	8	B
1#-5	0.30	6	D	4#-6	0.32	8	D
1#-6	0.29	6	E	5#-1	0.70	9	A
2#-1	0.13	6	E	5#-2	0.54	9	B
2#-2	0.18	6	E	5#-3	0.81	6	A
2#-3	0.15	6	E	5#-4	0.40	7	C
2#-4	0.25	6	E	6#-1	0.41	9	C
2#-5	0.37	6	D	6#-2	0.52	8	B
2#-6	0.25	6	E	7#-1	0.50	9	B
3#-1	0.36	6	D	7#-2	0.33	9	D
3#-2	0.28	8	E	8#-1	0.76	9	A
3#-3	0.35	8	D	8#-2	0.48	9	C
3#-4	0.48	7	C	9#	0.96	10	A
3#-5	0.32	5	D	10#-1	1.22	12	A
3#-6	0.24	6	E	10#-2	1.41	12	A
4#-1	0.31	7	D				

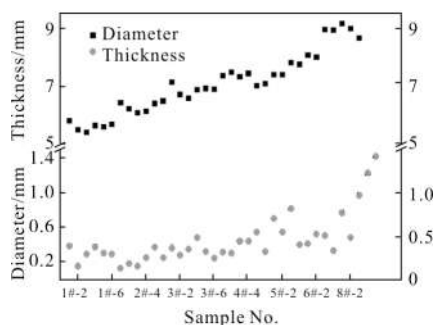


图 5 海水珍珠样品珍珠层厚度及直径散点图

Fig.5 Scatter image of thickness and diameter of sea pearls

来说,直径与珠层厚度呈弱正相关。依据“中华人民共和国国家标准《GB/T 18781-2008 珍珠分级》”对海水珍珠珠层厚度级别的划分标准<sup>[24]</sup>,将实验测得的海水珍珠的珠层厚度划分为以下 5 类(也列于表 3):

(1) A 级,特厚,珠层厚度  $\geq 0.6$  mm,共有 6 颗,即 5#-1、5#-3、8#-1、9#、10#-1 和 10#-2,珠层厚度范围为 0.70~1.41 mm,其中 3 颗南洋珠的珠层厚度

最大,均大于 0.9 mm。

(2) B 级,厚,  $0.6$  mm > 珠层厚度  $\geq 0.5$  mm,数量最少,共有 4 颗,即 4#-5、5#-2、6#-2 和 7#-1,珠层厚度范围为 0.50~0.54 mm。

(3) C 级,中,  $0.5$  mm > 珠层厚度  $\geq 0.4$  mm,共有 6 颗,即 3#-4、4#-3、4#-4、5#-4、6#-1 和 8#-2,珠层厚度范围为 0.40~0.48 mm。

(4) D 级,薄,  $0.4$  mm > 珠层厚度  $\geq 0.3$  mm,数量最多,共有 11 颗,即 1#-1、1#-4、1#-5、2#-5、3#-1、3#-3、3#-5、4#-1、4#-2、4#-6 和 7#-2,珠层厚度范围为 0.30~0.38 mm。

(5) E 级,极薄,珠层厚度 < 0.3 mm,共有 10 颗,即 1#-2、1#-3、1#-6、2#-1、2#-2、2#-3、2#-4、2#-6、3#-2 和 3#-6,珠层厚度范围为 0.15~0.29 mm。

### 2.2.3 珍珠的 OCT 纹理特征

对这批海水珍珠样品进行了系统的 OCT 二维图像采集,根据其纹理特征信息,可以对珍珠的结构

组织均匀性进行简单分类,为珍珠的质量评级提供参考。根据图像信息可以分为以下 5 类:

(1) 包括 1#-1(见图 6(a))、4#-5(见图 6(b))、4#-6、5#-1,计 4 颗,珠层细腻均匀,透明度较好,珠层与珠核层界线分明,过渡层明显且有一定厚度。

(2) 包括 1#-2、2#-1、2#-2、2#-6、3#-5、3#-6、4#-1、4#-2、4#-3、5#-4,计 10 颗,珠层极薄,较细腻均匀,可见珠核层纤维组织结构,珠核层一般呈近似平行的斜纹(如 2#-1,见图 6(c)),有的也出现竖纹(如 2#-2,见图 6(d)),珠层与珠核层界线较清晰,过渡层较薄。

(3) 包括 1#-3、1#-4、1#-5、1#-6、2#-3、2#-4、3#-4、5#-3、6#-1、6#-2、7#-1,计 11 颗,珠层薄或极薄,个别珠层较厚,散射较强,较细腻均匀(如 6#-1,见图 6(e)),偶见珠核层纤维组织结构(如 1#-4,见图 6(f)),珠层与珠核层界线分明,过渡层明显。

(4) 包括 2#-5、4#-4、5#-2、7#-2、8#-1、6#-2、8#-2(见图 6(h)),计 7 颗,珠层散射较强,珠层均匀性较差,可见与过渡层平行的条纹(如 5#-2,见图 6(g)),珠层与珠核层界线一般,过渡层不太清晰。又如样品 8#-2(见图 6(h)),珠层与珠核是灰度特征相似,过渡层不明显。

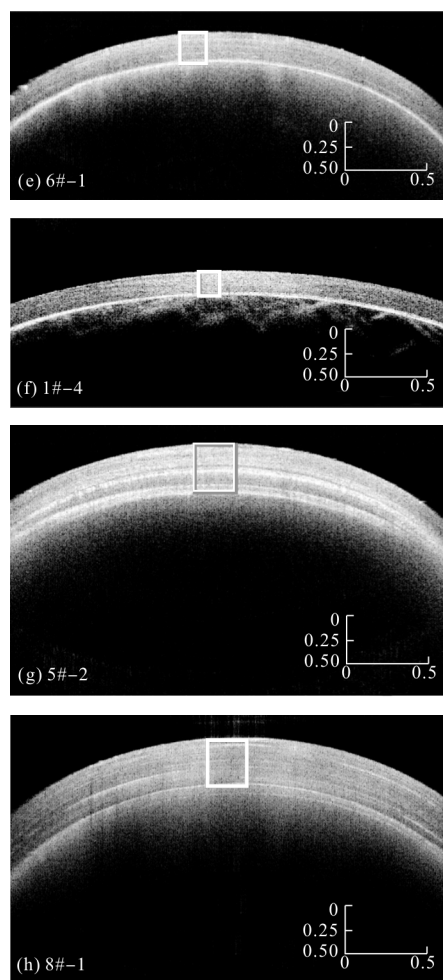
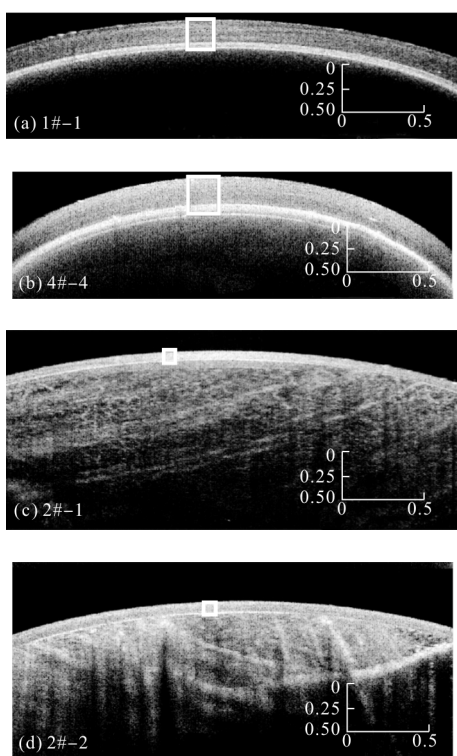


图 6 中国南珠典型 OCT 二维图像

Fig.6 Typical 2D OCT images of south pearls of China

(5) 南洋珠,包括 9#、10#-1、10#-2,计 3 件,珠层特厚,散射较强,质地均细腻,过渡层明显,珠层与珠核分界线清晰(如 9#,见图 7(a)),但近圆形样品(10#-1 和 10#-2)的珠层厚度不均匀,差异较大,过渡层极薄,珠层和珠核的灰度特征相似(如 10#-1,见图 7(b))。

为了便于比较这 5 类珍珠的均匀性差异,以珍珠层为例,尝试选取 2 个基于统计学灰度直方图一阶统计量(OCT 图像的灰度标准差  $\delta$  和 OCT 图像的熵  $e$ )<sup>[10]</sup>来表征珍珠样品内部结构信息。 $\delta$  参数可以反映整个 OCT 图像的粗糙度,可用于描述珍珠内部结构的变化程度。 $\delta$  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。



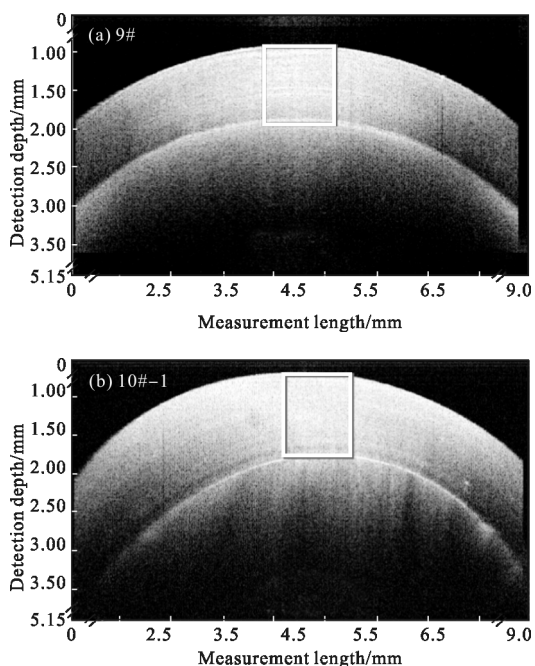


图 7 南洋珠典型 OCT 二维图像

Fig.7 Typical 2D OCT images of south sea pearl

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

$$e = -\sum_{i=0}^{L-1} p(z_i) \cdot \log_2 p(z_i) \quad (2)$$

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。

先将珍珠样品 OCT 的 csv 信息转换成二维图像,选取一段珍珠层作为感兴趣区域(见图 6 和图 7 方框标识区域),再将所选取的区域的图像大小进行归一化处理,最后根据公式计算出  $\delta$  和  $e$  的值,结果见表 4。可以看出,样品 1#-1 的  $\delta$  值最大,说明其图像灰度的变化较快,对应珍珠层的结构变化较快。而样品 2#-2 的  $\delta$  值最小,其变化较小,对应其珍珠层的结构变化较慢;样品 1#-4 的  $e$  最大,珍珠层灰度级最丰富,对应着不同等级的散射强度。而样品 10#-1 的  $e$  值最小,灰度级最单调,对应珍珠层的层次相对均匀。相对而言,前三类珍珠样品的  $\delta$  值差异较后两类大。

表 4 典型珍珠样品 2 个特征参数的计算结果

Tab.4 Calculation results of 2 characteristic parameter of typical pearls

Category	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)					
No.	1#-1	4#-5	2#-1	2#-2	6#-1	1#-4	5#-2	8#-2	9#	10#-1
$\delta$	28.68	25.94	24.18	19.96	26.72	22.01	25.74	23.40	24.09	25.51
$e$	0.95	0.88	0.94	0.94	0.89	0.97	0.91	0.92	0.90	0.83

### 3 结论

采用新型扫频 OCT 成像系统,对一批海水珍珠进行了无损分析。利用其测量和图形处理功能,快速、便捷、有效地测量了这批海水珍珠的珍珠层厚度,参考“国标《GB/T 18781-2008 珍珠分级》”中珍珠层厚度分类标准,对这批海水珍珠进行了质量分级归类,共分为 5 类,分别为 A 级(特厚)、B 级(厚)、C 级(中)、D 级(薄)和 E 级(极薄)。总体来看,这批海水珍珠样品的厚度与直径呈弱正相关。中国南珠的直径和厚度变化范围都比较大,直径约 5~9 mm,厚度约 0.1~8 mm。南洋珠的直径和厚度一般大于中国南珠,直径皆大于 8 mm,厚度皆大于 0.9 mm。同时,通过 OCT 二维图像的纹理特征分析,对这批海水珍珠的珍珠层、过渡层、珠核层组织的均匀性等进

行了归类。OCT 成像技术可为基于珍珠层厚度和内部组织均匀性的质量分级提供可靠的依据。为探索不同珍珠的特征差异,下一步将继续对珍珠样品均匀性、透明度等质量参数的定量表征进行图形学研究,并对珍珠进行化学成分和多光谱成像分析等多方探索研究,另文介绍。

### 参考文献:

[1] Liu Yong, Du Xiaodong, Deng Chenmao, et al. South pearl [J]. *Man and the Biosphere*, 2014, 86(2): 62-64. (in Chinese)  
刘永, 杜晓东, 邓陈茂, 等. 南珠[J]. 人与生物圈, 2014, 86(2):62-64.

[2] Grahame Brown. Australia's pearl industry [J]. *Journal of Gems & Gemmology*, 2000, 2(4): 1-6. (in Chinese)  
Grahame Brown. 澳大利亚的珍珠产业 [J]. 宝石和宝石学杂志, 2000, 2(4): 1-6.

- [3] Wang Like, Zhang Jiaying, Tian Lei, et al. OCT based air jet indentation for corneal biomechanical assessment [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 325–333. (in Chinese)  
王立科, 张佳莹, 田磊, 等. 基于光学相干层析气冲印压技术研究角膜生物力学特性 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(2): 325–333.
- [4] Sun Yankui. Medical image processing techniques based on optical coherence tomography and their applications [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4): 1086–1104. (in Chinese)  
孙延奎. 光学相干层析医学图像处理及其应用 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 1086–1104.
- [5] Liu Guozhong, Li Ping. 3D visualization velocimetry technique for microfluidic based on optics coherence tomography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 273–278. (in Chinese)  
刘国忠, 李萍. 光学相干层析技术微流场三维可视化测速方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 273–278.
- [6] Xu Peng, He Hong, Ding Zhihua. Research in subsurface morphologies of jades with optical coherence tomography [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(5): 210–214. (in Chinese)  
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): 210–214.
- [7] Yang M L, Lu C W, HSU I J, et al. The use of optical coherence tomography for monitoring the subsurface morphologies of archaic jades [J]. *Archaeometry*, 2004, 46(2): 171–182.
- [8] Dong Junqing, Li Qinghui, Yan Xin. Nondestructive analysis of section structure of common ceramic cultural relics based on OCT imaging technology [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2015, 37(5): 325–331. (in Chinese)  
董俊卿, 李青会, 严鑫. 基于 OCT 成像技术对常见陶瓷文物断面结构的无损分析[J]. 自然杂志, 2015, 37(5): 325–331.
- [9] Yan Xin, Dong Junqing, Li Qinghui, et al. Preliminary research in section structure characteristics of ancient glaze based on OCT technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(9): 0908001. (in Chinese)  
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.
- [10] Yan Xin, Dong Junqing, Liu Weidong, et al. Research on texture characteristics analysis of ancient glaze optical coherence tomographic image [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(5): 0508008. (in Chinese)  
严鑫, 董俊卿, 刘卫东, 等. 古代瓷釉光学相干层析图像的纹理特征分析研究[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0508008.
- [11] Yan Xin, Dong Junqing, Li Qinghui, et al. Preliminary research on bubble characteristics of ancient glaze using OCT technology [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(8): 2275–2280. (in Chinese)  
严鑫, 董俊卿, 李青会, 等. 基于 OCT 技术对古瓷釉气泡特征的初步研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(8): 2275–2280.
- [12] Dong J Q, Yan X, Li Q H, et al. Research on the characteristics of the glaze used in the different types of ceramics from Huangye Kiln in Gongyi using OCT technology [C]//Gan Fuxi, Li Qinghui, Henderson J. Recent Advances in the Scientific Research on Ancient Glass and Glaze. Singapore: World Scientific, 2016: 397–422.
- [13] 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. (in Chinese)  
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.
- [14] Liang H, Peric B, Hughes M, et al. Optical coherence tomography for art conservation & archaeology [C]//SPIE, 2007, 6618: 661805.
- [15] Zeng N, He Y, Ma H. Application of optical coherence tomography in Nacre identification and characterization [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2008, 50(2): 442–445.
- [16] Zeng Nan, He Yonghong, Ma Hui, et al. Pearl detection with optical coherence tomography [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(8): 1140–1145. (in Chinese)  
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.
- [17] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 23886–2009, Determination of nacre thickness—optical coherence tomography[S], 2009: 1–8. (in Chinese)  
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中华人民共和国国家标准化委员会. GB/T 23886–2009, 珍珠珠层厚度测定方法 OCT 法 [S], 2009: 1–8.

- [18] Koozekanani D, Boyer K, Roberts C. Retinal thickness measurements from optical coherence tomography using a Markov boundary model [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2001, 20(9): 900–916.
- [19] Gilboa G, Sochen N, Zeevi Y Y. Image enhancement and denoising by complex diffusion processes [J]. *Pattern Analysis & Machine Intelligence IEEE Transactions on*, 2004, 26(8): 1020–1036.
- [20] Fernandezd C, Salinas H M, Puliafito C A. Automated detection of retinal layer structures on optical coherence tomography images[J]. *Optics Express*, 2005, 13(25):10200–10216.
- [21] Baroni M, Diciotti S, Evangelisti A, et al. Texture classification of retinal layers in optical coherence tomography [C]//11th Mediterranean Conference on Medical and Biomedical Engineering and Computing, 2007: 847–850.
- [22] Chen Junhong, Hou Baohua. A method for automatic measurement of nacre thickness from optical coherence tomography images [J]. *Journal of Natural Science of Heilongjiang University*, 2014, 4(3): 405–410. (in Chinese)  
陈俊红, 侯保华. 基于光学相干层析图像的珍珠质厚度自动测量算法[J].黑龙江大学自然科学学报, 2014, 4(3): 405–410.
- [23] Li Jili, He Bin, Liu Weidong, et al. Nondestructive analysis of Jingdezhen and Longquan celadon wares excavated from Nanhai No.1 shipwreck [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(5): 1500–1507. (in Chinese)  
黎继立, 何斌, 刘卫东, 等. 南海一号出水景德镇窑与龙泉窑青瓷特征的无损分析研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(5): 1500–1507.
- [24] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T18781–2008, Cultured pearl grading [S], 2008: 1–12. (in Chinese)  
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中华人民共和国国家标准化委员会. GB/T 18781–2008 珍珠分级 [S], 2008: 1–12.
- [25] Li Maocai, Zhang Yan, Zhang Pengxiang, et al. Application of confocal micro-Raman spectroscopy in the characterization of pearl [J]. *Chinese Journal of Light Scattering*, 2000, 12(3): 161–164. (in Chinese)  
李茂材, 张燕, 张鹏翔, 等. 显微拉曼光谱在珍珠鉴定中的应用[J]. 光散射学报, 2000, 12(3): 161–164.
- [26] Gauldie R W, Sharma S K, Volk E. Micro-Raman spectral study of vaterite and aragonite otoliths of the coho salmon, *Oncorhynchus kisutch* [J]. *Comparative Biochemistry & Physiology Part A Physiology*, 1997, 118(3): 753–757.
- [27] Chen Yu, Guo Shouguo, Shi Lingyun. Application of spectroscopy in identification of golden saltwater pearl [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(6): 1706–1709. (in Chinese)  
陈育, 郭守国, 史凌云. 光谱学在金黄色海水珍珠鉴定中的应用[J]. 光学学报, 2009, 29(6): 1706–1709.