

天然金色海水养殖珍珠的微结构及其紫外-可见谱图特征研究

严俊^{1,2} 陶金波² 任叶叶³ 王孟清² 胡仙超³ 王小祥^{1*}

(¹ 浙江大学材料科学与工程学系, 浙江 杭州 310027; ² 浙江省质量检测科学研究院, 浙江 杭州 310013)

³ 浙江工业大学化学工程与材料学院, 浙江 杭州 310014

摘要 通过对不同直径大小、不同金色深浅的天然金色海水养殖珍珠的紫外-可见(UV- V_{is})吸收光谱、珍珠层微纳结构的扫描电子显微镜(SEM)与高分辨透射电镜(HR-TEM)分析及珍珠层厚度进行对比性研究,并探究了金珠颜色的深浅与珍珠层厚度间的联系及金珠独特的UV- V_{is} 谱图成因。结果表明:金珠的颜色越深,对应的UV- V_{is} 特征吸收峰的强度越大,但金珠珍珠层的厚度与金珠金色的深浅不存在正相关性;在同一颗金珠中不同区域的珍珠层的厚度、珍珠层表面的“叠瓦状”结构的疏密程度存在显著差异,推测上述差异可能是导致金珠的UV- V_{is} 吸收光谱存在区域差异性的影响因素;此外,在珍珠层中存在典型的准一维光子带隙结构,该结构应与金珠的呈色或呈色深浅有密切的关联。

关键词 天然金色海水养殖珍珠;紫外-可见吸收光谱;珍珠层;叠瓦状结构;厚度;光子带隙结构

中图分类号 P619.28; O433 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0416005

Study on Microstructure and UV- V_{is} Spectra Characteristics of Natural-Color Golden Seawater Cultured Pearl

Yan Jun^{1,2} Tao Jinbo² Ren Yeye³ Wang Meiqing² Hu Xianchao³ Wang Xiaoxiang¹

¹ Department of Material Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

² Zhejiang Institute of Quality Inspection Science, Hangzhou, Zhejiang 310013, China

³ College of Chemical Engineering and Materials Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

Abstract A comparative studies on the morphology of micro/nano-structure, the thickness of nacreous layer of natural-color golden seawater cultured pearl with different diameters and golden shades are carried out by ultra-violet and visible (UV- V_{is}) absorption spectrum, scanning electron microscopy (SEM) and high resolution transmission electron microscopy (HR-TEM). Furthermore, the relations between the thickness of nacreous layer and the color and the unique characteristic of UV- V_{is} spectra are further discussed. The results show that: the intensity of absorption band in UV- V_{is} absorption spectra is increasing as the deep color of golden-color pearl, the deep or light color of golden-color pearl has no direct relation with the thickness of nacreous layer. It is found that the thickness of nacreous layer located in different regions on the surface of golden-color pearl is different. Meanwhile, the density of “imbricate” structure and the morphology of the surface of golden-color pearl are different. The above characteristics maybe result to the slight varied UV- V_{is} absorption spectra with different regions on the surface of nacreous layer. In addition, one dimensional quasi-photon band gap structure exists in the nacreous layer of golden-color pearl, which should have close relations with the coloring of golden pearl and the density of golden-color.

Key words natural-color golden seawater cultured pearl; ultra-violet and visible absorption spectra; nacreous layer; imbricate structure; thickness; photonic band gap structure

OCIS codes 160.1435; 160.4760; 160.5293; 330.1710

收稿日期: 2013-10-24; 收到修改稿日期: 2013-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(21173193)、浙江省教育厅项目(Y201225711)、浙江省质量检测科学研究院博士科研启动资金(2013BS01)创新团队基金(KC-07)

作者简介: 严俊(1981—),男,工程师,博士后,主要从事珠宝方面的研究。E-mail: yanj_zjut@163.com

* 通信联系人。E-mail: wangxx_zju@163.com

1 引言

珍珠为一类深受人们喜爱的有机宝石,自古就有“珠宝皇后”的美誉,其中的天然金色海水养殖珍珠(简称“金珠”)因其具有富贵绚丽、象征希望的金黄色愈加备受珠宝玉石爱好者的喜爱,其主体一般分为两个主要的结构单元,其中黄色区域为金珠的显色区域,即外层的珍珠层,珍珠层的厚度在不同的珍珠样品中各有差异。内层为白色的珠核,多为海水贝壳构成^[1]。限于金珠样品的珍稀、市场价值较高,因此目前相关金珠的研究多属非破坏性研究,且较多文献多是聚焦于金珠的真伪辨别^[1-4]、“金色珍珠”(染色金珠)的染色处理工艺研究^[5],而相关金珠的破坏性研究,如珍珠层金黄色的颜色成因、珍珠层与其内核的微纳米结构特征的研究却鲜有报道。特别是涉及其染色鉴别方法中紫外-可见(UV-Vis)特征图谱中出现的若干问题仍存在极为激烈的争议,例如金珠表面不同区域其 UV-Vis 谱图存在相异性、吸收光谱中吸收峰位的归属问题等。更值得注意的是,在本课题组就金珠的日常检测过程中常见金珠呈现的金黄色深浅、色泽不一,上述金珠金黄色的深浅是否与金珠样品中其外层珍珠层的厚度存在正相关性亦尚未见有文献报道。

在本工作中,首次就金珠珍珠层的厚度与其金黄色的深浅间联系进行初步探讨,以为为金珠的颜色及其颜色深浅的成因提供理论解释。同时,较系统地对比金珠表面的不同珍珠层区域的 UV-Vis 谱图的相异性及其珍珠层横截面的微结构进行分析,上述研究工作对金珠的染色鉴别及相关金珠颜色成因的解释提供了较重要的理论依据,并为人工仿生合成有色功能材料提供设计灵感与参考模板。

2 实验部分

2.1 实验样品

本工作中测试采用的珍珠样品共 62 颗,部分实验样品由杭州国际珠宝城天地润珠宝(样品名称标记为:TDR)公司提供,其他实验样品相继购置于近期的香港(标记为:HK)的珠宝展会。

2.2 实验仪器

样品的 UV-Vis 吸收光谱测试仪器为 Opal 3000 Pro(上海复享仪器有限公司),内置 PG2000 Pro 型光纤光谱仪,附积分球。单次测量中 CCD 采集的次数为 1 次,背景与光源采集的光滑度设置为 1(记

为: $B_{xr}=1$,下同),实验样品测试时 B_{xr} 设定为 1 或 10(记为: $B_{xr}=1$ 或 $B_{xr}=10$),单次 CCD 采集时间为 500 ms,测量波长范围为 UV-Vis 区间。

金珠样品的珍珠层厚度测试采用 OSG-1000 光学相干珠层厚度测量仪测试,测试地点为国家珠宝玉石质量监督检验中心(北京),测试时采用垂直测量模式。

金珠的珍珠层外表面及其横截断面的微结构形貌特征采用 Hitachi FE-SEM S-4700 场发射扫描电镜观察,样品经镀金处理,工作电压 15 kV。珍珠层粉体试样在高分辨透射电镜下进行观察(Tecna G2 F30 S-Twin, 荷兰 Philips-FEI 公司),其点分辨率为 0.18 nm,工作电压 300 kV,采用 CCD 照相机,曝光时间 1 s。

3 结果与讨论

3.1 不同金色深浅的金珠珍珠层厚度对比分析

本工作中以两个批次的金珠样品为例,其物理特征如表 1 所示,其中所选的被检样品的直径大小、金珠的金黄色的深浅具有较明显的差异。下述样品经 UV-Vis 吸收光谱测试表明所有样品均具有典型的天然海水养殖金珠的 UV-Vis 吸收特征^[1-3],即在 UV-Vis 吸收光谱中存在 360 nm 左右的吸收峰。

上表 1 中金珠样品 HK-2 与 HK-11、HK-8 与 HK-9 及 TDR-2 与 TDR-4,对比该三组珍珠在不同质量、不同直径与不同金色深浅前提下对应的珍珠层厚度大小,可以发现深黄色金珠珍珠层的厚度并不一定大于颜色较浅的金珠的珍珠层的厚度,上述珍珠层的光学相干法测试结论与不同金色深浅的金珠的横截剖面的珍珠层厚度测量结论相一致。由此可以判定金珠的珍珠层的厚度与金珠的金色深浅并无正相关性。

更值得注意的是,若金珠的金色成因只源于金珠珍珠层中的致色有机质,如类似类胡萝卜素^[6]或聚乙炔类物质^[7],且上述有机质多存在于珍珠层中文石板片的夹层间,则随着珍珠层厚度的增加,珍珠层中的致色有机质的含量也将有所增加,因此必然导致金珠的金色更为饱和、浓重,但是鉴于上述金珠金色深浅与其显色区域即珍珠层的厚度无直接关联,上述推理与实验结论并不一致,可见金珠的有机质致色机理存在一定的局限性。

表 1 典型的天然金色海水养殖金珠样品物理特征

Table 1 Physical characteristics of typical natural-color golden cultured pearl

| Sample | Weight /g | Average diameter /mm | Color | Shape | Thickness of nacreous layer /mm |
|--------|-----------|----------------------|--------------|--------------------|---------------------------------|
| HK-1 | 2.4526 | 11.96 | Dark yellow | Circle | 2.223 |
| HK-2 | 2.4946 | 12.15 | yellow | Circle | 2.285 |
| HK-8 | 2.7342 | 12.67 | Light yellow | Circle | 2.432 |
| HK-9 | 2.7847 | 12.83 | Dark yellow | Circle | 1.963 |
| HK-10 | 3.3614 | — | Light yellow | Oval | — |
| HK-11 | 3.8203 | 13.75 | Dark yellow | Circle minor fault | 1.960 |
| TDR-1 | 0.7246 | 7.98 | Light yellow | Circle | 1.024 |
| TDR-2 | 1.7517 | 10.61 | Light yellow | Circle | 2.730 |
| TDR-3 | 2.0985 | 11.32 | Yellow | Circle | 2.167 |
| TDR-4 | 3.1341 | 12.99 | Dark yellow | Circle | 2.335 |
| TDR-5 | 3.3418 | 13.31 | Yellow | Circle | — |
| TDR-6 | 4.1339 | 14.32 | Dark yellow | Circle | 3.488 |
| TDR-7 | 4.9817 | 15.20 | Yellow | Circle | — |

3.2 不同金色深浅的金珠 UV-V_{is} 谱图特征

进一步对上述两个批次的不同金色深浅的金珠进行 UV-V_{is} 吸收光谱测试,其中两个批次的金珠的光学照片见图 1(a)与图 1(c),且两者分别对应的 UV-V_{is} 的吸收谱图见图 1(b)与图 1(d)所示。从上述两个批次的金珠的光学照片与其对应的吸收谱图明显可以发现,金珠的金黄色越深,其对应的 UV-

V_{is} 吸收光谱中的 360 nm 左右处的特征吸收峰的强度越强,如金珠样品 HK-1 与 HK-11、TDR-6 与 TDR-4。反之,金珠的金黄色越浅,该样品的吸收峰强度越低,吸收峰的峰形也渐为宽化,见金珠样品 HK-10, TDR-2 等,上述现象如先前的研究结论具有一致性^[1-2]。

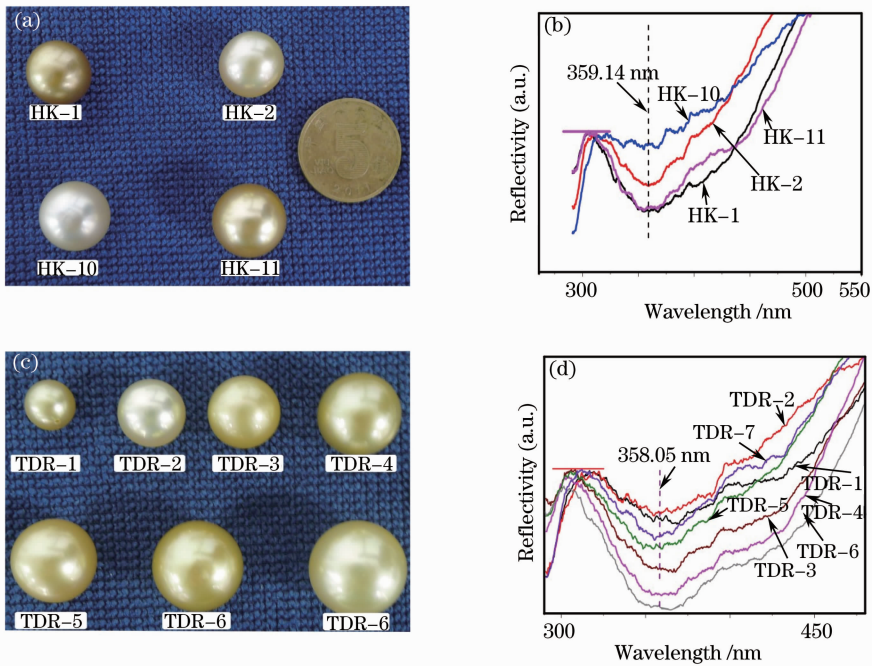


图 1 金珠的光学照片[(a), (c)]与其对应的 UV-V_{is} 吸收光谱[(b), (d)]

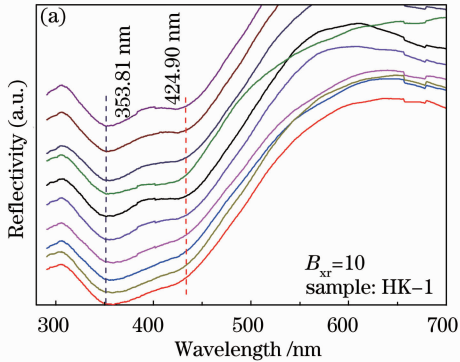
Fig. 1 Optic photos [(a), (c)] and their corresponding UV-V_{is} absorption spectra [(b), (d)] of natural-color golden cultured pearl

3.3 同一颗金珠 UV-V_{is} 谱图相异性的影响因素

对同一颗金珠进行 UV-V_{is} 吸收光谱进行测试,以 HK-1, HK-2 样品为例,两者的吸收光谱如图 2

所示。本文发现在金珠的珍珠层不同测试表面区域,UV-V_{is} 吸收光谱存在明显的差异性,表现在 354.75~425.60 nm 段的吸收谱的斜率变化差异

性,如金珠 HK-1 在某一区域,存在 424 nm 处的较弱的吸收,元利剑等将其归属为外来的有机染料引起,但是在另一测试区域,谱图中 424 nm 处的吸收



峰则并不明显,上述特征在天然金珠样品中都普遍存在。

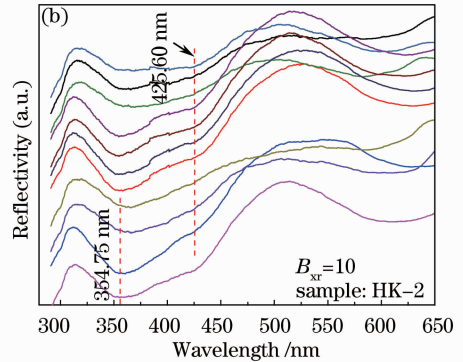


图 2 金珠样品 HK-1(a)与 HK-2 (b)珍珠层不同位置的 UV-V_{is} 吸收光谱

Fig. 2 UV-V_{is} absorption spectra of natural-color golden pearl on different regions of the surface of nacreous layer [HK-1-(a); HK-2-(b)]

鉴于上述金珠 UV-V_{is} 吸收谱图的相异性特征,对于同一颗金珠而言,一方面,其 UV-V_{is} 吸收光谱的区域差异性与珍珠中内部存在的有机质无明显的联系,原因在于同一颗金珠中的有机质在珍珠中特别是在珍珠层中的分布应较为均匀,不同区域的珍珠层中有机质分布或有机质的含量不应该有显著的差异性,因此金珠吸收光谱表现出的差异不应由内部的有机质引起;另一方面,吸收谱图中存在的 424 nm 处的吸收峰也不应由外来的有机染料导致,因外来的有机染料就珍珠的染色工艺不可能局限于某一区域,而应是整个珍珠层的染色。据此,染色金珠的 UV-V_{is} 的吸收谱图更趋于稳定,而不会出现上述珍珠样品的 UV-V_{is} 吸收光谱的区域差异性。综上所述,可以初步认为上述金珠的 UV-V_{is} 吸收光谱的差异性应与金珠中珍珠层的微结构存在必然的联系。

图 3 是同一颗金珠珍珠层的表面及断面的 SEM 照片[图(a)~(d)]与光学照片[图(e)]。图 3(a)呈现出金珠表面的“叠瓦状”微结构形貌特征,从中可清晰的发现在金珠表面的不同区域中其“叠瓦状”结构的疏密程度存在明显区别,见 B 与 C 区域对应的 SEM 照片。从金珠珍珠层断面的 SEM 与光学照片[图 3 (d)、(e)]可以看出,金珠整体的珍珠层的厚度在不同的径向方向上亦存在显著的差异,该特征在金珠的珍珠层厚度的光学相干法测试过程中同样发现。在检测过程中,珍珠表面结构的瑕疵缺陷密度、表面的光洁度同样影响其 UV-V_{is} 吸收光谱特征,并由此导致其 UV-V_{is} 特征吸收峰宽化或是蓝移。鉴于此,可

以进一步认为珍珠的珍珠层表面及其内部的微结构差异性应是引起上述不同区域的 UV-V_{is} 吸收谱图存在差异的主要原因。

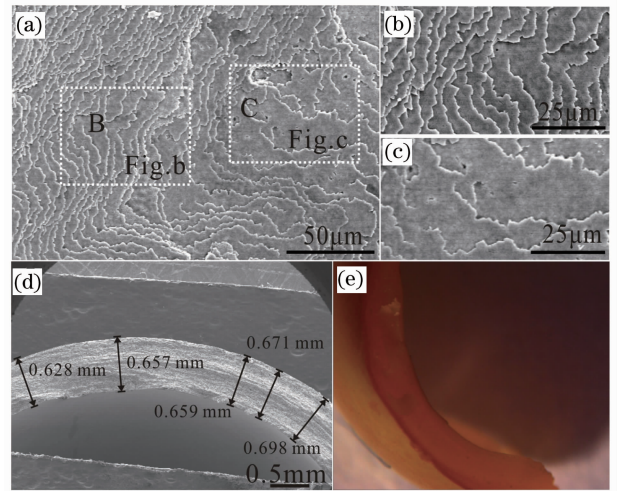


图 3 金珠珍珠层表面(a)~(c)及断面的 SEM(d)与光学照片(e)

Fig. 3 SEM (a) ~ (d) and optic photos (e) of the surface and cross section of nacreous layer of natural-color golden cultured pearl

3.4 金珠珍珠层颜色成因初探

对金珠珍珠层断面微结构进行分析,发现金珠珍珠层同样为多层文石板片与有机蛋白质周期交接而成,形成典型的“砖-浆-桥”结构^[8-9]。其中“砖”为文石型碳酸钙板片^[8],折射率约为 1.65,“浆”为有机蛋白,折射率约为 1.40^[10],且有机蛋白在上述“砖-浆”结构中起粘结相邻的两层文石板片的作用,如图 4(b)所示。鉴于上述文石板片与有机质在图 4

(b)中的 X 轴方向上形成了介质呈周期性变化的结构特征,该结构与一维的光子带隙结构[见图 4(c)]类同^[11-14]。

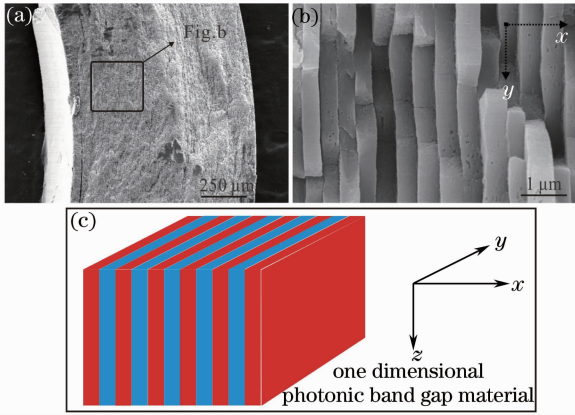


图 4 金珠珍珠层断面的 SEM 照片(a)~(b)与一维光子带隙结构模型(c)

Fig. 4 SEM photos (a)~(b) of the crossing section of nacreous layer of natural-color golden cultured pearl and the model of one dimensional photonic band gap structure (c)

进一步就金珠的珍珠层进行微纳米结构分析,在珍珠层表面的“叠瓦状”[见图 5(a)]结构中,可见单层的瓦片结构中存在二级的结构单元,即单一的文石瓦片由众多不规则的多边形小板片拼接而成,如图 5(b)所示。就图 5(b)中白色虚线区域中二级的不规则文石小板片进行放大观察,如图 5(c)所示。从中可清晰的发现上述文石小板片由众多的纳米文石颗粒组成,且文石晶体颗粒粒径处于 30~50 nm 左右。上述珍珠层微纳米复合结构模型如图 5(d)所示,珍珠层表面微结构的特征与李晓东

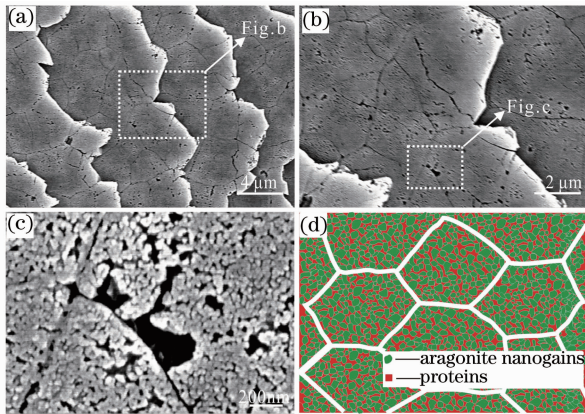


图 5 金珠珍珠层表面的 SEM 照片(a)~(c)与其相应的理论结构模型(d)

Fig. 5 SEM photos (a)~(c) of the surface of nacreous layer of natural-color golden cultured pearl and the corresponding structure model (d)

等^[15-16]对红鲍鱼(RA)壳珍珠层微结构的原子力显微镜(AFM)及张刚生等^[17]对翡翠贻贝(PV)贝壳珍珠层的微结构的 HR-TEM 与 SEM 观察结论一致。

与此同时,就珍珠层断面进行扫描透射电镜(STEM)观察,珍珠层粉体的高分辨扫描透射电镜照片如图 6(a)所示,选取其中的白色虚线区域放大观察,如图 6(b)、(c)所示。从中可以清晰地发现文石板片上存在众多的纳米孔洞,说明文石小板片是由众多的文石小颗粒粘合而成,进一步对上述区域进行选区电子衍射(SAED)分析,如图 6(d)所示,结果表明其无机相为纳米文石微晶,文石小颗粒由有机蛋白质粘接,而纳米孔洞则是文石微晶小颗粒间的间隙。但其 SAED 结果表明所选区域为单晶(规则的衍射点阵)或多晶(一系列的同心圆环)混合态,该混合态可能源于研磨后纳米粉体颗粒因表面能的增加而附着在文石板片上导致。结合上文中珍珠层表面的 SEM 照片分析,珍珠层断面的结构模型如图 6(e)所示。

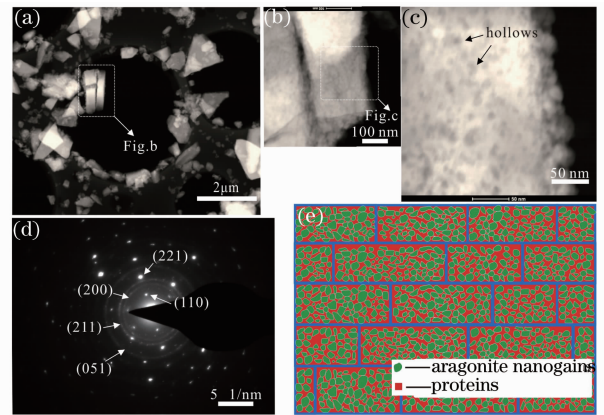


图 6 金珠珍珠层断面的 STEM (a)~(c)、SAED (d)照片与其对应的理论结构模型(e)

Fig. 6 STEM morphology (a)~(c) and SAED pattern (d) of the crossing section and surface of nacreous layer of natural-color golden cultured pearl and the corresponding structure model (e)

对金珠珍珠层的微纳米结构的电镜观察,可将珍珠层微结构进一步归属为“准一维的光子带隙”结构,原因在于金珠的珍珠层中微米文石板片不是由单一的文石介质构成,其内部尚存在次级结构单元即纳米文石小颗粒。李博等^[18]将鲍鱼壳呈现的黄色归因其内部的珍珠层与有机质构成的典型的一维光子带隙结构导致,且在前期对淡水育珠蚌三角帆蚌的贝壳珍珠层中存在的光子带隙结构亦曾有过论述^[19]。而金珠的珍珠层内部微结构与上述文献

[18—19]中所述的带隙结构类似。因此,金珠的珍珠层呈现出的黄色是否同样与其中存在的一维光子带隙结构有关仍有待进一步研究。

4 结 论

通过对不同直径大小、不同金色深浅的天然金色海水养殖珍珠颜色深浅、UV-V_{is}吸收光谱及珍珠层厚度进行对比性研究,发现金珠样品的颜色越深,其对应的UV-V_{is}谱图中特征吸收峰的强度越大,但金珠样品的珍珠层的厚度与金珠的颜色深浅不存在正相关性。

同一颗金珠不同区域珍珠层整体的厚度、珍珠层表面的“叠瓦状”结构等存在差异,初步认为上述差异是导致金珠的UV-V_{is}吸收光谱存在区域差异性的直接原因。

金珠珍珠层的微结构形貌中文石型碳酸钙板片与有机质周期粘结,该结构与一维光子带隙结构材料具有极类似的结构特征,可初步将其归属为“准一维的光子带隙”结构,上述微结构的存在是否与金珠珍珠层呈现的黄色存在因果联系,且在不同金色深浅的金珠中,其相应的珍珠层中文石板片的厚度是否与金色的深浅有关这些问题仍有待进一步研究。

致谢 感谢同济大学亓利剑教授对本文紫外-可见吸收光谱测试工作提供的指导,感谢浙江杭州国际珠宝城天地润珠宝陈剑青经理提供的部分实验样品,感谢国家珠宝玉石质量监督检验中心(NGTC)魏然老师对本文珍珠层厚度测试实验提供的帮助,在此一并深表谢意!

参 考 文 献

- 1 Qi Lijian, Huang Yilan, Zeng Chunguang, *et al.*. Colouration attributes and UV-NIS reflection spectra of various golden seawater cultured pearls [J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 2008, 10(4): 1—8.
亓利剑, 黄艺兰, 曾春光, 等. 各类金色海水珍珠的呈色属性及UV-V_{is}的反射光谱[J]. *宝石与宝石学*, 2008, 10(4): 1—8.
- 2 S Elen. Spectral reflectance and fluorescence characteristics of natural-color and heat-treated golden south sea cultured pearls [J]. *Gems & Gemology*, 2001, 37(2): 114—123.
- 3 S Elen. Update on the identification of treated golden south sea cultured pearls [J]. *Gems & Gemology*, 2002, 38(2): 156—159.
- 4 Chen Yu, Guo Shouguo, Shi Lingyun, *et al.*. Application of spectroscopy in identification of golden saltwater pearl [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(60): 1706—1709.

- 陈 育, 郭守国, 史凌云, 等. 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.
- 5 Liu Wenwen, Li Liping. Technology and identification of golden dyed pearls [J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 2007, 9(4): 33—36.
刘雯雯, 李立平. 珍珠的金黄色染色工艺及染色珍珠的鉴定[J]. *宝石与宝石学杂志*, 2007, 9(4): 33—36.
- 6 Zhang Gangsheng, Xie Xiande, Wang Ying. Raman spectra of carotenoid in the nacre of *Hyriopsis cumingii* (Lea) shell [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2001, 21(3): 389—392.
张刚生, 谢先德, 王 英. 三角帆蚌贝壳珍珠层中类胡萝卜素的激光拉曼光谱研究[J]. *矿物学报*, 2001, 21(3): 389—392.
- 7 Qin Zuolu, Ma Hongyan, Mu Shichun, *et al.*. Research on relationship between color and raman spectrum of freshwater cultured pearl of good quality [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2007, 27(11): 73—75.
秦作路, 马红艳, 木士春, 等. 优质淡水珍珠的体色及其与拉曼光谱的关系 [J]. *矿物学报*, 2007, 27(11): 73—75.
- 8 F Song, A K Soh, Y L Bai. Structural and mechanical properties of the organic matrix layers of nacre [J]. *Biomaterials*, 2003, 24(20): 3621—3631.
- 9 F Song, Y L Bai. Effects of nanostructures on the fracture strength of the interfaces in nacre [J]. *Journal of Material Research*, 2003, 18(8): 1741—1744.
- 10 M R Snow, A Pring, P Self, *et al.*. The origin of the color of pearls in iridescence from nano-composite structures of the nacre [J]. *American Mineralogist*, 2004, 89(10): 1353—1358.
- 11 E Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(20): 2059—2062.
- 12 S John. Strong localization of photonics in certain disordered dielectric super lattices [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(20): 2486—2489.
- 13 E Yablonovitch. Photonic band gap structures [J]. *J Opt Soc Am B*, 1993, 10(2): 283—294.
- 14 Deng Kaifa, Shi Dufang, Jiang Meiping, *et al.*. Progress in the study of photonic crystal [J]. *Chinese J Quantum Electronics*, 2004, 21(5): 555—564.
邓开发, 是度芳, 蒋美萍, 等. 光子晶体研究进展[J]. *量子电子学报*, 2004, 21(5): 555—564.
- 15 X Li, W Chang, Y J Chao, *et al.*. Nanoscale structural and mechanical characterization of natural nanocomposite material: the shell of red abalone [J]. *Nano Letters*, 2004, 4(4): 613—617.
- 16 X Li, Z H Xu, R Z Wang. In situ observation of nanograin potation and deformation in nacre [J]. *Nano Letters*, 2006, 6(10): 2301—2304.
- 17 G Zhang, J Xu. From colloidal nanoparticles to a single: new insights into the formation of nacre's aragonite tables [J]. *Journal of Structural Biology*, 2013, 182(1): 36—43.
- 18 Li Bo, Zhou Ji, Li Longtu, *et al.*. One dimensional photonic band gap in Abalone shell [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(13): 1422—1424.
李 勃, 周 济, 李龙土, 等. 鲍鱼壳中的一维光子带隙结构 [J]. *科学通报*, 2005, 50(13): 1422—1424.
- 19 Yan Jun, Zhang Gangsheng. Studying on the shell structural property of *crustaria plicata* and the coloring mechanism of nacreous layer [J]. *Journal of Anqing Teachers College (Natural Science Edition)*, 2011, 17(3): 83—85.
严 俊, 张刚生. 褶皱纹冠蚌贝壳结构特征及其彩虹色呈色机制 [J]. *安庆师范学院学报(自然科学版)*, 2011, 17(3): 83—85.

栏目编辑: 李志兰