

美国睡美人绿松石的宝石学矿物学特征研究

白旭萌, 刘迎新

(中国地质大学 珠宝学院, 北京 100083)

摘要: 美国西南部亚利桑那州是高品质绿松石的主要产地之一。本文通过常规宝石学、紫外-可见分光光度法、X射线粉晶衍射、红外光谱、显微观察、波长色散X射线荧光分析等方法,对天然美国睡美人绿松石以及扎克里法处理、注胶处理的睡美人绿松石进行研究,测试分析其宝石学、矿物学特征,并对其颜色和高硬度成因进行探讨。结果显示,美国睡美人绿松石较其他产地绿松石结构致密,致蓝色元素(Cu^{2+})含量高,从而形成了其较高的硬度和纯净的蓝色。经过扎克里法和注胶处理的绿松石,其结构更为致密稳定,扎克里法处理绿松石中K元素含量增高,注胶处理绿松石的红外光谱在 1735 cm^{-1} 处有特征的弱吸收带,为有机质胶中 $\nu(\text{C}=\text{O})$ 伸缩振动所致。

关键词: 美国睡美人绿松石; 扎克里; 注胶; 矿物组成; 化学成分

中图分类号: P578.92⁺7

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)S2-0061-08

Gemological and mineralogical characteristics of the Sleeping Beauty turquoise from the USA

BAI Xu-meng and LIU Ying-xin

(School of Gemology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Arizona State in southwest USA is one of the main producing areas of high-quality turquoises. Natural, Zachary-treated and plastic injection processed Sleeping Beauty turquoises were investigated with the purpose of analyzing their gemological and mineralogical characteristics and explaining the causes of their beautiful color and high hardness. These characteristics were studied by such methods as conventional gemological tests, ultra-violet-visible spectrophotometry, XRD, infrared spectrum, microscopic observation, and WDXRF analysis. The results confirm that, compared with turquoises from other producing areas, the Sleeping Beauty turquoise from the USA has more compact structure and higher Cu^{2+} content, which can explain its higher hardness and purer color. Zachary and injecting process-treated turquoise has more compact and stable structure. WDXRF test of Zachary-treated turquoise shows a visible increase of K element. The infrared spectrum of plastic injection-treated turquoise shows a characteristic weak absorption band at 1735 cm^{-1} , caused by the $\nu(\text{C}=\text{O})$ stretching vibration of the organic compound.

Key words: American Sleeping Beauty turquoise; Zachary; injecting; mineral components; chemical composition

近年来,睡美人绿松石以近乎完美的外观越来越受到人们的喜爱。美国睡美人绿松石矿位于亚利桑那州,该绿松石以天蓝色为主,有时会有偏绿或偏浅的色调。矿皮呈白色,很少见铁线,瑕疵多为裂隙

或褐黄色坑洼(余平等,1991)。结构致密,光泽较一般绿松石强。为了对睡美人绿松石有更全面的认识,本文选择天然的睡美人绿松石、扎克里法处理和注胶的睡美人绿松石3种样品,分别进行宝石学特

收稿日期: 2014-08-12; 修订日期: 2014-08-25

作者简介: 白旭萌(1992-),女,学士,从事宝石和材料工艺学研究, E-mail: baixumeng@cugb.edu.cn; 通讯作者: 刘迎新, E-mail: liuyingxin@cugb.edu.cn。

征、矿物成分的研究,并初步探讨了睡美人绿松石的颜色及高硬度成因。

1 样品

本文选取了3组睡美人绿松石样品(图1),具体描述如下。

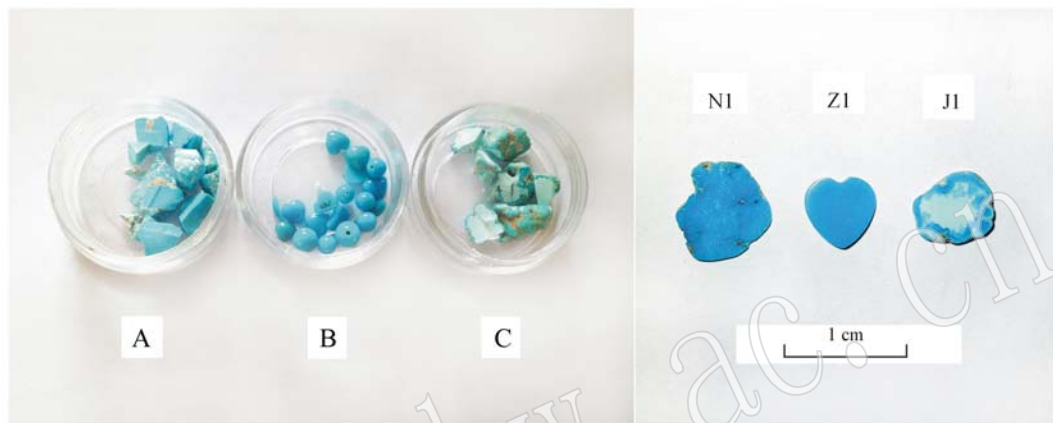


图1 美国睡美人绿松石样品分组与薄片样品

Fig. 1 Three groups of American Sleeping Beauty turquoises and slice samples

片磨成0.5 mm厚的抛光薄片,编号为J1。

2 实验与讨论

2.1 常规宝石学测试

图2给出了3种睡美人薄片样品在宝石显微镜下,分别用暗域、顶光照明时,在透射、反射光线下的结构特征。测试地点:中国地质大学(北京)珠宝学院测试中心。放大倍数:30倍、40倍。相机型号:Canon 550D。

由图2可知,天然的睡美人绿松石具明显的粒状结构,晶粒间边界清晰、颗粒饱满,形状、大小不同,分布致密、自然;晶粒间颜色稍有差异,形成了天然睡美人绿松石表面的花白斑纹外观,仅在靠近表面位置有皮壳留下的裂隙和杂质,内部几乎没有杂质,也少见铁线。

扎克里法处理绿松石样品(Z1)呈隐晶质结构,看不到晶粒的分布以及晶粒间的缝隙,颜色分布非常均匀。扎克里法处理的样品是3种样品中透明度最好的,这可能与扎克里处理法的处理过程及添加物有关,具体处理过程和添加物未可知。

A组:天然睡美人绿松石。原石碎块及碎片,N2~N4,其中一片磨成0.5 mm厚的抛光薄片,编号为N1;原石碎块切割为随形戒面N5。

B组:扎克里法处理的睡美人绿松石。6 mm心形戒面成品6枚,编号Z1~Z6,其中Z1磨成0.5 mm厚的抛光薄片。另有4 mm和6 mm圆珠若干。

C组:注胶处理的睡美人绿松石,原石。切割一

注胶处理的绿松石样品(J1)其浸胶的部分,绿松石晶粒边界由于充填物变得十分模糊,颜色不均匀;中间未浸胶部分在反射光观察下也可以观察到不甚清晰的晶粒边界,与其疏松的质地有关。

对比我国湖北竹山产出的绿松石(表面见“白脑”、“白筋”、铁线,铁线有下凹的现象,常与石英、褐色铁矿、黄铁矿共生)(张胜男,2012),天然睡美人绿松石成分较为单一、没有杂质,结构致密,这也是其具备相对较高硬度的主要原因。扎克里法将这种高品质的绿松石进一步改善,在特有的处理方式和添加物的作用下使得绿松石结构更为致密,颜色更为均匀,甚至形成了带有玻璃光泽的完美外观。注胶处理样品本身质量稍差,结构相对来说较为疏松,注胶后表层硬度、颜色得到改善,然而由于胶质的存留,注胶处理睡美人绿松石在光泽上差于天然睡美人绿松石。

3组样品的详细宝石学测试结果见表1。

2.2 紫外-可见分光光度计分析

样品分别选取天然N1、扎克里法处理Z1和注胶处理的睡美人绿松石J1薄片样品进行测试,薄片厚度为0.5 mm,双面抛光。

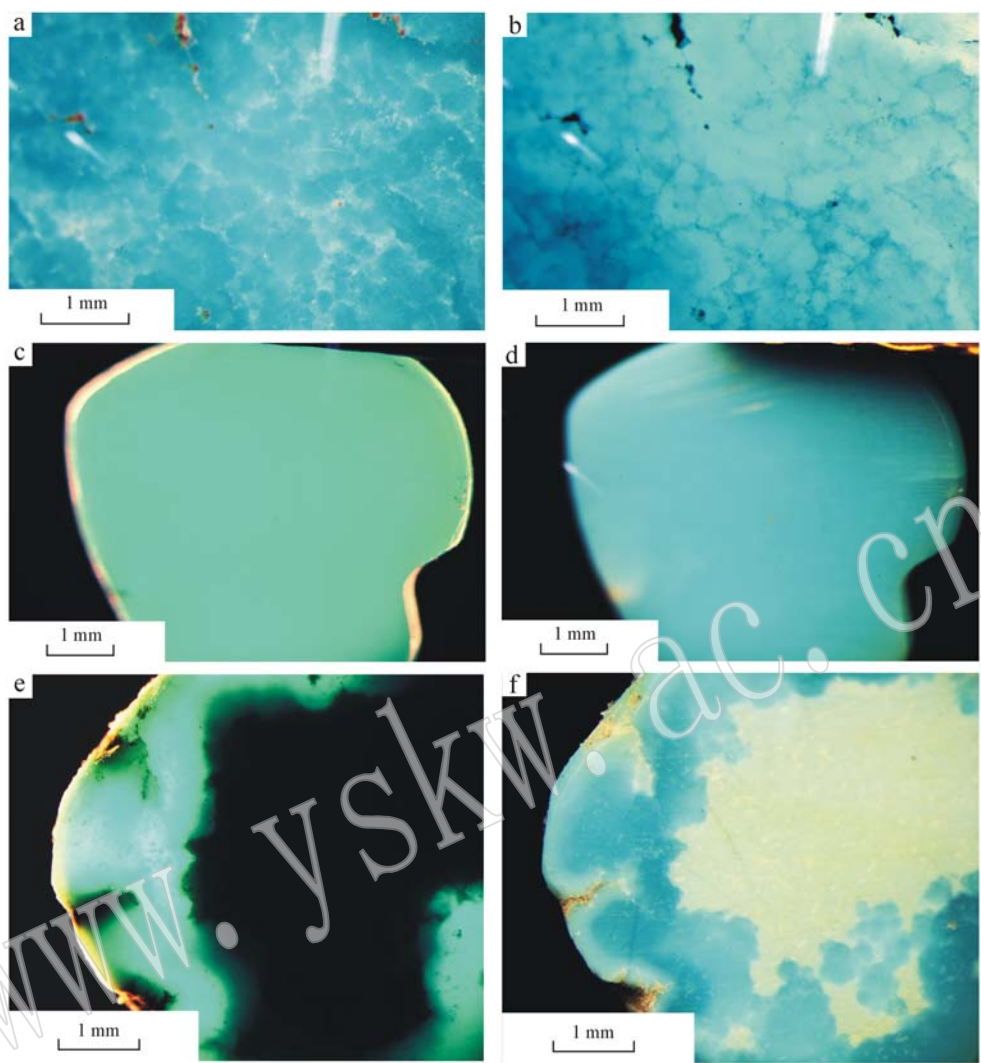


图 2 天然、扎克里法处理和注胶处理的睡美人绿松石样品的显微放大照片(左:透射光,右:反射光)

Fig. 2 Enlarged microphotographs of natural, Zachary-treated and injection-treated Sleeping Beauty turquoise samples

(left: transmitted light; right: reflected light)

a、b—天然样品, c、d—扎克里法处理样品, e、f—注胶处理样品

a, b—natural samples; c, d—Zachary treated samples; e, f—injection samples

表 1 美国睡美人绿松石样品的常规宝石学特征

Table 1 Conventional gemological characteristics of Sleeping Beauty turquoise samples

样品分类	天然	扎克里处理	注胶处理
外观	天蓝色,弱玻璃光泽,表面常有花白斑纹,不透明,靠近皮壳部分颜色加深	蓝色,玻璃光泽,颜色均匀,裂隙两侧颜色加深,微透明	蓝绿色,蜡状光泽不透明
放大检查	粒状结构,较致密	隐晶质结构,致密	注胶部位晶粒空隙不可见
折射率(点测)	1.61	1.61	1.60
相对密度(平均值)	2.71	2.60	2.64
紫外荧光	长波:弱蓝白色,同一样品强度不均匀;短波:无	长波:较强蓝白色,同一样品强度均匀,颜色越蓝、结构越细腻、透明度越好的样品荧光越强;短波:无	长波:注胶部位中等蓝绿色荧光;短波:无
硬度(平均值)	5~6	5~5.5	4~5
韧性/脆性	韧性较好	韧性很好	脆性强(切割时有强烈刺鼻气味)

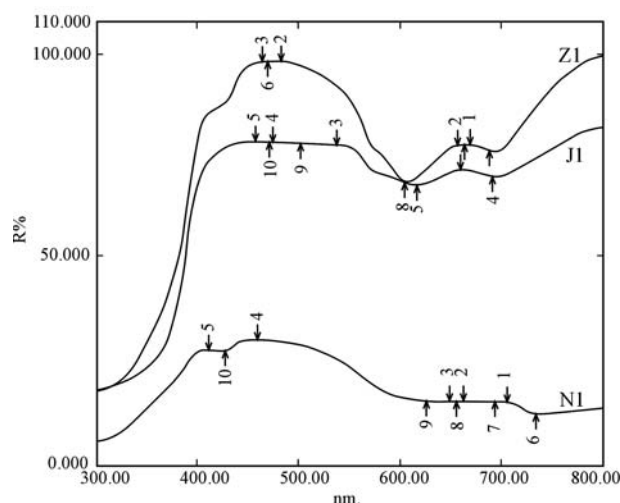


图3 样品的紫外-可见光谱图

Fig. 3 Uv-vis spectra of three groups of samples

实验地点: 中国地质大学(北京)珠宝学院。仪器型号: 波长范围: 300.00~900.00 nm; 扫描速度: 高速; 采样间隔: 0.5; 仪器类型: UV-3600 系列; 光源转换波长: 310.00 nm; 检测器转换波长: 830.00 nm; 光栅转换波长: 720.00 nm; 光束模式: 双光束; 测试方法: 反射式。

3组睡美人绿松石样品的紫外-可见光吸收光谱形状基本相似, 吸收带主要集中于 450~500 nm、650~700 nm 附近, 与天然绿松石在 420 nm、432 nm、460 nm 有吸收带的特征基本一致(图3)。

3组样品中都有 670 nm 附近的吸收峰, 根据研究表明, 绿松石 Cu^{2+} 离子晶场谱中的最强吸收带位于 670 nm 附近, 它的作用就是在可见区吸收光的红色成分, 使绿松石呈其互补色天蓝色(金莉莉, 2008)。3种样品中, 扎克里法处理的天然睡美人绿松石颜色最蓝, 而样品测试数据中, 扎克里法处理绿松石在 669.50 nm 处的吸收峰值最强, 从光谱特性上为其颜色表征做出了证明。

2.3 X射线粉晶衍射分析(XRD)

3组睡美人绿松石样品的 XRD 实验在北京大学地球与空间科学学院进行。仪器型号 Xpert Pro MPD, 灌流管压 40 mA, 40 kV, 步长 $0.017^\circ/\text{步}$, 扫描方式连续, 扫描范围 $5\sim 70^\circ$, 阳极靶 Cu 靶。

天然睡美人绿松石粉晶样品衍射图谱中衍射峰的位置与标准绿松石衍射谱(JCPDF 50-1655)几乎一致, 很少出现有杂峰, 说明其矿物主要组成是绿松石且纯度较高(图4)。

从3组粉晶样品的图谱可以看出, 经过处理的睡美人绿松石(扎克里、注胶)相同位置的衍射峰值更高, 说明在该位置, 经过处理的睡美人绿松石结构相对更致密。笔者在 $24^\circ\sim 31^\circ$ 范围内选取了 6 个特征衍射峰(图5), 使用 Jade6.0 软件的计算功能分别计算对应的结晶度, 结果记录在表2中。数据显示, 扎克里法处理和注胶处理睡美人绿松石的平均结晶

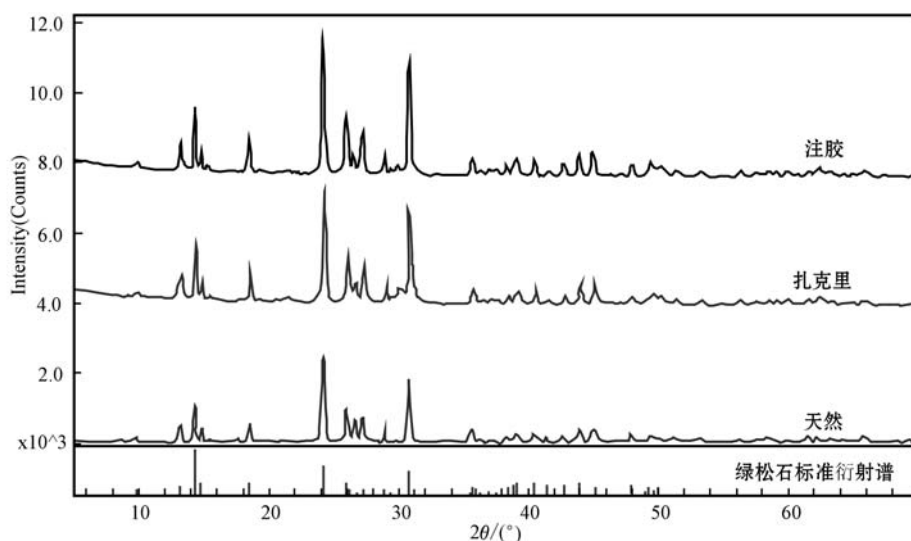


图4 样品的X射线粉晶衍射图

Fig. 4 X-ray powder diffraction patterns of three groups of turquoises

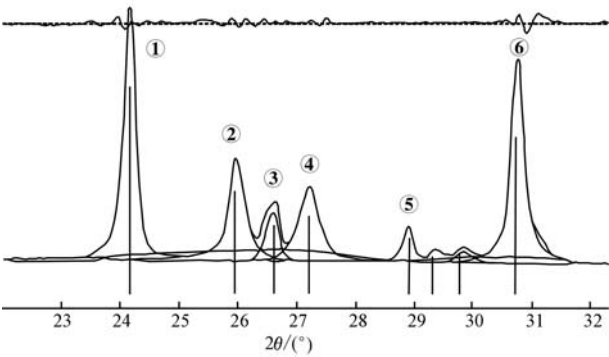


图 5 3 组粉晶样品部分特征衍射峰

Fig. 5 Some characteristic diffraction peaks of three sets of powder samples

度要高于天然的睡美人绿松石,说明处理过程对睡美人绿松石的结晶程度有一定的改善。

2.4 红外光谱

本实验采用天然睡美人绿松石样品(编号 N1)、扎克里法处理戒面样品(编号 Z1~Z6)、注胶处理薄片样品(编号 J1)进行反射式无损鉴定。实验地点:中国地质大学(北京)珠宝学院测试中心。仪器型号:VECTOR33 型傅里叶变换红外光谱仪。测试条件:测试范围:400~4000 cm^{-1} ;工作电压:220 V;测试时间:1 分钟;实验温度:室温。

图 6 给出了 3 组睡美人绿松石样品(标本号 N1)的反射式红外吸收光谱。其中,天然睡美人绿松

表 2 3 组粉晶样品部分特征衍射峰的结晶度

Table 2 Crystallinity of some characteristic diffraction peaks of three sets of powder samples

特征峰		①	②	③	④	⑤	⑥
天然	角度	24.179°	25.958°	26.565°	27.213°	28.890°	30.744°
	结晶度	70.93%	83.22%	94.97%	85.60%	96.48%	72.51%
	(误差)	(1.14%)	(2.50%)	(5.53%)	(1.91%)	(6.92%)	(1.56%)
扎克里	角度	24.165°	25.930°	26.600°	27.188°	28.893°	30.722°
	结晶度	71.14%	85.89%	93.55%	87.38%	97.30%	73.22%
	(误差)	(2.15%)	(4.11%)	(6.38%)	(3.25%)	(9.26%)	(2.69%)
注胶	角度	24.183°	25.906°	26.472°	27.179°	28.898°	30.724°
	结晶度	70.66%	83.85%	97.28%	89.35%	97.73%	73.49%
	(误差)	(1.4%)	(3.14%)	(12.11%)	(2.73%)	(9.21%)	(2.16%)

石的强反射峰主要集中在 1 120.49、1 045.07、1 002.85、649.05、571.52 和 482.46 cm^{-1} ,参考陈全

莉的研究结论(陈全莉等,2006),并与马鞍山天然绿松石的红外吸收光谱对比,可知天然的睡美人绿松

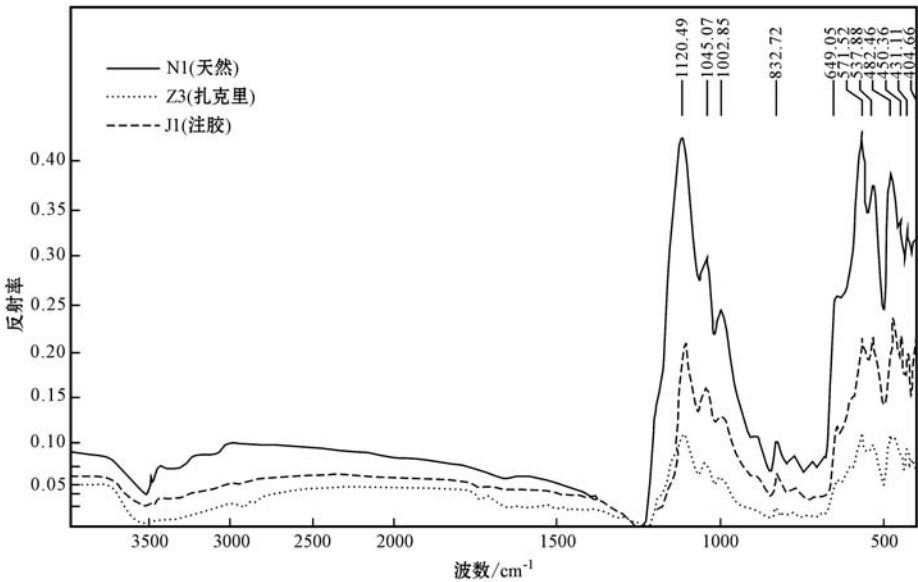


图 6 3 组睡美人绿松石样品的红外反射光谱

Fig. 6 Infrared spectral reflectance of three groups of Sleeping Beauty turquoise samples

石主要矿物组成为绿松石。

对比前人文献(陈全莉等, 2006; 张胜男, 2012), 可对天然睡美人绿松石(N1)的反射式红外吸收光谱谱峰进行指派。其中, $3\,500\text{ cm}^{-1}$ 附近的小吸收峰是由 $\nu(\text{OH})$ 伸缩振动所致, $1\,631\text{ cm}^{-1}$ 弱吸收峰由 $\delta(\text{H}_2\text{O})$ 弯曲振动所致, 833 cm^{-1} 的吸收峰由 $\delta(\text{OH})$ 弯曲振动所致。 $1\,120.49$ 、 $1\,045.07$ 、 $1\,002.85\text{ cm}^{-1}$ 的反射峰由 $\nu_3(\text{PO}_4)$ 伸缩振动导致, 649.05 、 571.52 和 482.46 cm^{-1} 的反射峰由磷酸根基团 $\nu_4(\text{PO}_4)$ 弯曲振动导致。

根据参考文献(Fritsch *et al.*, 1999), 扎克里法处理与天然的睡美人绿松石的红外反射光谱应没有明显差异。而由扎克里法处理睡美人绿松石样品(Z1~Z6)的红外反射光谱可以看出, $1\,730\text{ cm}^{-1}$ 附近出现一组一致的弱吸收峰, 但由于该处理方法没有有机物的注入而表面有过蜡优化, 因而这组吸收峰可能是蜡中的有机成分 $\nu(\text{C}=\text{O})$ 伸缩振动所致(图6)。

注胶的样品在 $1\,735\text{ cm}^{-1}$ 附近出现红外吸收弱谱带, 而天然睡美人绿松石样品没有出现这个位置的吸收带, $1\,718\text{ cm}^{-1}$ 处 $\nu(\text{C}=\text{O})$ 伸缩振动致红外吸收弱谱带是具鉴定意义的, 证明样品是使用有机胶处理的。但样品没有检测出有机物应有的 $2\,926$ 、 $2\,855\text{ cm}^{-1}$ 波数的红外吸收弱谱带(为充填物中 $\nu_{\text{as}}(\text{CH}_2)$ 反对称伸缩振动和 $\nu_{\text{s}}(\text{CH}_2)$ 对称伸缩振动所致)以及 $1\,456\text{ cm}^{-1}$ 处 $\delta(\text{CH}_2)$ 弯曲振动所致的红外吸收弱谱带。

2.5 波长色散X射线荧光分析(WDXRF)

根据文献(Glazer, 1988; Fritsch *et al.*, 1999), 扎克里法处理方法的原理是模拟美国著名绿松石金曼矿口富钾长石的成矿背景, 而唯一的鉴定特征是样品中钾含量有明显增高。因此本文通过X射线荧光分析, 探讨天然睡美人绿松石致色元素Cu、Fe的含量以及不同处理方法中元素含量的变化。

实验地点: 北京北达燕园微构分析测试中心。
测试仪器: 扫描型波长色散X射线荧光光谱仪(WDXRF); 仪器型号: Thermo electron corporation (美)ARL ADVANT XP+; 测试条件: 粉末状样品, X光管Rh钨, 激发电压50 kV, 激发电流50 mA, 环境温度 25°C , 湿度20%。3组睡美人绿松石测试样品的数据结果见表3所示。

由表3可知, 天然的睡美人绿松石主要氧化物

含量为 Al_2O_3 (38.30%)、 P_2O_5 (28.61%)、CuO (7.45%)、 SiO_2 (4.58%)。对比绿松石标准化学式 $\text{CuAl}_6[\text{PO}_4]_4(\text{OH})_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 其理论值为 Al_2O_3 36.84%、 P_2O_5 34.12%、CuO 9.57%, 可见天然的睡美人绿松石样品的化学成分和标准值接近, 再次验证睡美人绿松石的主要成分为绿松石。

测试数据显示, 天然的睡美人绿松石的致色元素氧化物CuO含量达到了7.45%, 比前人文献中湖北竹山绿松石的CuO含量(5.45%~6.68%)(金莉莉, 2008)要高很多; 而影响绿松石红黄色调的 Fe_2O_3 含量为0.865%, 湖北竹山绿松石的 Fe_2O_3 含量为0.95%~3.83%, 相比之下也较低。因此睡美人绿松石能够呈现较为纯净的天蓝色。

天然、扎克里法处理、注胶处理的睡美人绿松石部分化学元素相对含量可见图7, 扎克里法处理睡美人绿松石中, K含量(0.757%)比天然(0.434%)和注胶处理(0.107%)的睡美人绿松石的有明显增高, 与研究资料(Fritsch *et al.*, 1999)中的结论一致。但由于其具体处理原理和方式未知, K元素在绿松石中是否起到的改善颜色和结构的作用还有待研究。除此之外, Zn元素含量明显较低、微量元素Na明显增高, 可能与其处理过程中加入添加物, 并发生Zn元素被类质同像替代导致。Pb、Cl元素的明显增高是样品被污染的原因造成。

注胶处理睡美人绿松石具有明显较少的 SiO_2 含量和较高的As含量, 可能与其处理过程中加入有机胶添加物有关。

两种处理方法处理过的睡美人绿松石出现了Mg、Pt、Au、Cr、Ar等天然睡美人绿松石中没有的微量元素, 可能是在处理过程中受处理环境影响所加入的杂质。

因此, 睡美人绿松石致密的结构和较高的Cu元素含量导致了其高硬度、明亮的光泽和鲜艳的天蓝色, 造就了美国睡美人绿松石完美的外观。

3 结论

(1) 睡美人绿松石颜色主要为蓝色到蓝绿色, 天然的睡美人绿松石表面可见花白纹, 越靠近皮壳部位颜色越深, 放大观察可见清晰的晶粒边界。紫外荧光长波下呈弱蓝色荧光, 短波下呈惰性。扎克里法处理的睡美人绿松石放大观察呈隐晶质结构,

表 3 3 组睡美人绿松石样品 XRF 元素分析结果

Table 3 XRF element analyses of Sleeping Beauty turquoise samples

样品名称		天然		扎克里		注胶		理论值	
Com	El	m/m%	m/m%	m/m%	m/m%	m/m%	m/m%	m/m%	m/m%
Al ₂ O ₃	Al	38.30	20.27	37.74	19.97	39.72	21.02	36.84	19.90
P ₂ O ₅	Px	28.61	12.48	27.35	11.94	27.82	12.14	34.12	15.23
CuO	Cu	7.45	5.95	8.24	6.58	7.54	6.02	9.57	7.86
SiO ₂	Si	4.58	2.14	2.09	0.978	1.09	0.510		
Fe ₂ O ₃	Fe	0.865	0.605	0.989	0.691	0.734	0.513		
K ₂ O	K	0.523	0.434	0.912	0.757	0.129	0.107		
PbO	Pb	0.188	0.174	1.42	1.32	0.207	0.192		
ZnO	Zn	0.106	0.085 2	0.022 0	0.017 7	0.200	0.161		
TiO ₂	Ti	0.101	0.060 5	0.088 8	0.053 2	0.231	0.139		
CaO	Ca	0.044 2	0.031 6	0.084 6	0.060 5	0.127	0.090 9		
Na ₂ O	Na	0.035	0.026 0	0.335	0.249	0.079	0.058 4		
Cl	Cl	0.005 6	0.005 6	0.036 0	0.036 0	0.006 3	0.006 3		
V ₂ O ₅	V	0.004 3	0.002 4	0.001 5	0.000 84	0.004 4	0.004 4		
MnO	Mn	0.001 3	0.001 0	0.003 0	0.002 3	0.001 6	0.001 2		
As ₂ O ₃	As	0.016 0	0.012 1	0.016 4	0.012 4				
MoO ₃	Mo	0.009 2	0.006 1	0.012 6	0.008 4				
MgO	Mg			0.075 4	0.045 5	0.032 9	0.019 8		
PtO ₂	Pt			0.007 1	0.006 1	0.005 4	0.004 6		
Au	Au			0.005 3	0.005 3	0.004 7	0.004 7		
Cr ₂ O ₃	Cr			0.001 6	0.001 1	0.007 3	0.005 0		
Ar	Ar			0.016 4	0.016 4	0.012 9	0.012 9		
La ₂ O ₃	La	0.012 3	0.010 5						
Bi ₂ O ₃	Bi	0.002 4	0.002 2						
Rb ₂ O	Rb	0.001 4	0.001 3						
S	S	0.016 0	0.160						
SO ₃	Sx			0.298	0.119				
Sc ₂ O ₃	Sc					0.016 4	0.010 7		
La ₂ O ₃	La					0.008 9	0.007 6		
Bi ₂ O ₃	Bi					0.002 1	0.001 9		

理论值数据引自张蓓莉等(2006)。

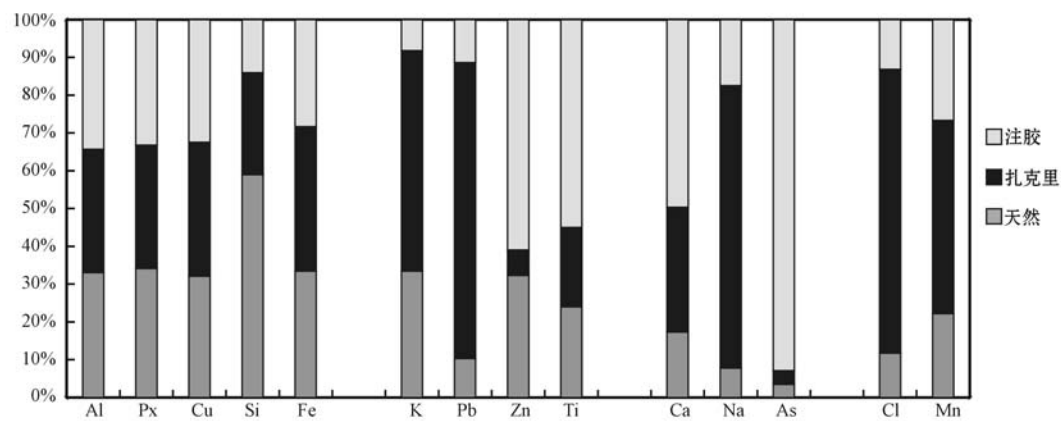


图 7 3 组样品部分化学元素相对含量对比图

Fig. 7 Relative values of some chemical elements in three groups of samples

紫外荧光测试呈较强蓝白色荧光,相对密度、硬度稍低于天然的睡美人绿松石。

(2) 睡美人绿松石的高硬度主要是因为其成分较为单一,结构致密;扎克里法将这种高品质的绿松石进一步改善,在特有的处理方式和添加物的作用下使得绿松石结晶度提高、颜色更为均匀;注胶处理样品本身质量稍差,结构相对较为疏松,但注胶后表层硬度、颜色得到改善。

(3) XRD 实验证明睡美人绿松石矿物组成为绿松石,经过处理的睡美人绿松石结晶度要高于天然的睡美人绿松石。紫外-可见光谱图表明样品的天蓝色由 Cu^{2+} 引起。天然与扎克里法处理的睡美人绿松石从红外光谱测试上并不能做出明显区分,而注胶处理的睡美人绿松石在 1735 cm^{-1} 附近出现有鉴定意义的 $\nu(\text{C}=\text{O})$ 伸缩振动致红外吸收弱谱带。

(4) X 荧光光谱分析表明天然睡美人绿松石有相对高的 Cu 元素含量、较低的 Fe 元素含量,形成纯净的天蓝色;扎克里法处理的绿松石有相对较高的 K 元素含量(鉴定特征之一)。

References

- Chen Quanli, Qi Lijian and Zhang Yan. 2006. The infrared absorption spectrum of Turquoise, substandard goods and imitations[J]. Journal of Gems & Gemmology, 8(1): 9~12(in Chinese).
- Fritsch E, McClure S F, Ostrooumov M, *et al.* 1999. The identification of Zachery-treated turquoise[J]. Gems & Gemology, 35(1): 4~16.

- Glazner A F. 1988. Stratigraphy, structure, and potassic alteration of Miocene volcanic rocks in the Sleeping Beauty area, central Mojave Desert, California[J]. Geological Society of America Bulletin, 100(3): 424~435.
- Jin Lili. 2008. The Color of Hubei Zhushan Turquoise and the Effect on Color of Water [D]. China University of Geoscience, Beijing(in Chinese).
- Yu Ping and Feng Wenhe. 1991. The eternal sky-the development and use of turquoise of United States[J]. Non-metallic Mineral Resources and Precious Stones Abroad, 1(in Chinese).
- Zhang Beili, Wang Manjun and Li Jingzhi. 2006. System Gemological [M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Zhang Shengnan. 2012. The Comparison of Hubei Zhushan Natural Turquoise and the Optimization Turquoises [D]. China University of Geoscience, Beijing(in Chinese).

附中文参考文献

- 陈全莉, 元利剑, 张一琰. 2006. 绿松石及其处理品与仿制品的红外吸收光谱表征[J]. 宝石和宝石学杂志, 8(1): 9~12.
- 金莉莉. 2008. 湖北竹山绿松石颜色成因及水对颜色的影响[D]. 中国地质大学(北京).
- 余平, 封文和. 1991. 永恒的天空——美国人对绿松石的开发与利用[J]. 国外非金属矿与宝石, 1.
- 张蓓莉, 王曼君, 李景芝. 2006. 系统宝石学(第二版)[M]. 北京: 地质出版社.
- 张胜男. 2012. 湖北竹山天然绿松石与优化处理绿松石的对比研究[D]. 中国地质大学(北京).