

拉曼光谱在鸡血石鉴定中的应用

韩孝朕¹ 郭正也¹ 康 燕² 刘学良¹ 郭守国¹

¹华东理工大学宝石检测中心, 上海 200237

²华东理工大学分析测试中心, 上海 200237

摘要 利用激光显微拉曼光谱仪,对市场上俗称“鸡血石”的6块产地不同的样品进行测试分析。测试得到6块样品的特征拉曼光谱,可为无损鉴定提供一定参考。临安市昌化镇玉岩山的3块鸡血石样品的“血”为同一种矿物,均为辰砂(HgS);“地”包括地开石、高岭石、明矾石或石英等不同的矿物成分。临安市潜川镇紫溪村的鸡血石样品“血”为赤铁矿(α -Fe₂O₃),“地”为纯度较高的地开石。桂林鸡血石样品“血”为赤铁矿,而“地”是硬度较高的石英。贵州鸡血石样品的“血”是辰砂,“地”是黑色、灰色的碳酸盐矿物。各样品测得的X射线粉晶衍射数据结果与激光显微拉曼光谱数据一致。

关键词 光谱学;鸡血石;拉曼光谱;辰砂;地开石;明矾石

中图分类号 P575.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0130003

Application of Raman Spectroscopy in Certification of Chicken-Blood Stones

Han Xiaozhen¹ Guo Zhengye¹ Kang Yan² Liu Xueliang¹ Guo Shouguo¹

¹Gemstone Testing Center, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

²Instrumental Analysis Center, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

Abstract Six pieces of chicken-blood stones from different origins are tested and analyzed with a laser micro-Raman spectrometer. Characteristic Raman spectra of the 6 stone samples are obtained and helpful for the non-destructive identification of chicken-blood stones. “Blood” of the 3 pieces of chicken-blood stones from Yuyan Mountain, Changhua Town, Lin’an, is cinnabar (HgS). The main mineral composition in Di of the 3 samples is different, which probably contains dickite, kaolinite, alunite, quartz or other minerals. “Blood” of the sample from Zixi is hematite (α -Fe₂O₃) and its Di is high purity dickite. “Blood” of the sample from Guilin is hematite and its Di is quartz. “Blood” of the sample from Guizhou is cinnabar and its Di is carbonate mineral. The data tested by X-ray powder diffraction are consistent with that by laser micro-Raman spectroscopy.

Key words spectroscopy; chicken-blood stone; Raman spectrum; cinnabar; dickite; alunite

OCIS codes 300.6450; 180.5655; 300.6560; 300.6490

1 引 言

当前市场上销售的鸡血石品种繁多、产地各异,主要有浙江昌化鸡血石、内蒙古巴林鸡血石、贵州鸡血石、广西桂林鸡血石、陕西旬阳鸡血石等。昌化和巴林鸡血石具有颜色鲜艳的“血”和细腻温润的“地”,稀少珍贵,长期以来深受收藏者的喜爱和市场的追捧。桂林鸡血石是市场上出现较晚的一个鸡血石品种,“血”色殷红鲜艳且稳定,硬度较高,为广大印章石赏石爱好者所喜爱。贵州省内产出的鸡血石颜色斑驳、黑白相间,与传统的“刘关张”鸡血石相似,在市场上也深受欢迎。目前关于桂林鸡血石和贵州鸡血石的文献资料

收稿日期: 2014-07-29; 收到修改稿日期: 2014-08-18

作者简介: 韩孝朕(1986—),男,博士研究生,主要从事珠宝玉石研究与鉴定等方面的研究。E-mail: igemhan@163.com

导师简介: 郭守国(1954—),男,教授,博士生导师,主要从事宝石改善工艺及各类宝石的检测等方面的研究。

E-mail: gsg@ecust.edu.cn

比较少,而关于昌化鸡血石和巴林鸡血石的研究资料相对较多。文献[1-3]通过X射线粉晶衍射、红外光谱、岩石薄片等研究方法对昌化和巴林鸡血石进行了广泛的测试分析,认为鸡血石“地”的主要矿物成分是地开石或高岭石,还有少量伊利石、明矾石等;“血”的主要矿物成分是辰砂(HgS)。

鸡血石是中国的一个特色玉石品种,具有悠久的文化和广阔的市场。国家标准对鸡血石有着非常明确的定义和鉴定标准,国家标准(GB/T 16553-2003)规定:鸡血石的“血”是辰砂,“地”的主要矿物是地开石、高岭石和叶蜡石。在历史文化的影下,随着昌化和巴林鸡血石矿产资源日益减少和逐渐枯竭,市场上鸡血石的商业概念也在悄悄变化。在市场上品种繁多的鸡血石中,准确区分出国家标准中严格定义的鸡血石对消费者有着重要的意义。

市场上鸡血石的价值愈来愈高,利用大型仪器对鸡血石进行无损鉴定也愈来愈重要。之前对鸡血石的研究主要通过电子探针、扫描电子显微镜、X射线粉晶衍射、红外光谱、偏光显微镜等仪器和手段,陈涛等^[2,4]曾对天然鸡血石、仿造鸡血石及鸡血石中部分矿物的拉曼光谱进行了分析研究。本文从对样品无损鉴定的角度出发,尝试借助激光显微拉曼光谱仪及其具备的高空间分辨率(约 $2\ \mu\text{m}$)和灵敏度,对不同产地和外观的6个鸡血石样品的表面微区进行针对性测试,包括样品的“地”、“血”、无色晶体、白色矿物和具金属光泽的矿物等。

2 样品与测试

实验样品为4块昌化鸡血石、1块桂林鸡血石和1块贵州鸡血石。将6块样品切成薄片(厚约 $2\ \text{mm}$)、粗抛光,并根据产地和外观对样品进行编号。编号CA、CB和CC的样品均来自浙江临安市昌化镇玉岩山,这3个样品“地”的颜色具有明显差异;编号CD的样品产自浙江临安市潜川镇紫溪村,“血”的颜色较暗,“地”的硬度较高;编号GL的样品产自广西桂林市龙胜县,“血”色稳定、无规律地分布于白色“地”上,“地”是白色、灰白色的半透明至透明矿物,部分矿物呈脉状、条带状分布;编号GZ的样品产自贵州三都水族自治县,“地”呈浓淡不均的深黑色、深灰色,“血”色鲜艳,质地紧密,色彩斑驳。

制备好的6个样品薄片和具体测试位置如图1所示。图1(a)~(f)中所有标有1的位置为每个样品“血”的拉曼光谱采集位置,标有2的位置为“地”的拉曼光谱采集位置;图1(a)、(b)、(d)、(f)中标有3的位置为具金属光泽的矿物的拉曼光谱采集位置;图1(a)中标有4的位置和图1(c)中标有3的位置为具六边形横截面的无色晶体的拉曼光谱采集位置;图1(f)中标有4的位置为样品GZ中脉状、团块状白色矿物的拉曼光谱采集位置。

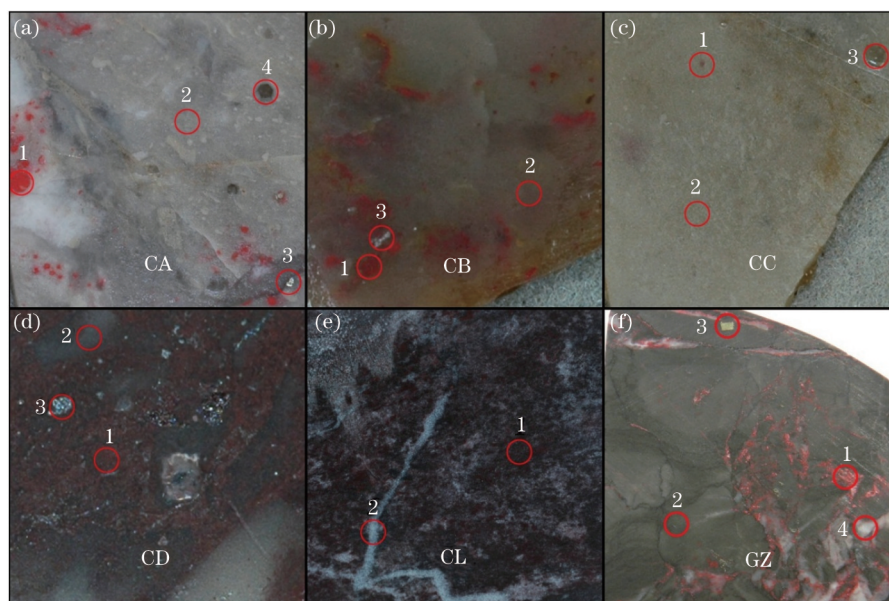


图1 鸡血石样品薄片及数据采集位置

Fig.1 Chicken-blood stone samples and data collecting positions

拉曼光谱由配备徕卡光学显微镜的inVia+Reflex型激光显微拉曼光谱仪测试采集,所配光学显微镜最大放大倍数为500倍。测试样品时,首先在低倍放大视野中选定待测微区,然后逐渐调至高倍放大视野并精

确定测试微区;激光器波长为785 nm,测试时激光光斑直径约为2 μm ,功率约为10 mW,曝光时间为20 s,叠加2次,扫描范围为100~1500 cm^{-1} ,室温为23 $^{\circ}\text{C}$,湿度为60%。测试样品前利用硅片对拉曼光谱仪进行校准,误差控制在0.05 cm^{-1} 以下。每个样品的“血”、“地”及其表面矿物都采集得到了相应的拉曼光谱。绘制样品的拉曼光谱时,部分曲线经过扣除背景处理。

取少量样品研磨,对每个样品的矿物组成进行X射线粉晶衍射分析。采用仪器为布鲁克D8型X射线粉晶衍射仪,测试条件如下:Cu K α 辐射,工作电压为40 kV,电流为40 mA,2 θ 扫描范围为10 $^{\circ}$ ~80 $^{\circ}$,步长为0.02 $^{\circ}$,扫描速度为6 $^{\circ}$ /min。

3 拉曼光谱分析

3.1 各鸡血石样品“血”的拉曼光谱

对6个样品“血”[图1(a)~(f)标有1处]进行了拉曼光谱测试,结果如图2所示。其中,昌化鸡血石样品CA、CB、CC和贵州鸡血石样品GZ的“血”的拉曼光谱相同,都具有141,249,284和340 cm^{-1} 的拉曼峰,与辰砂的拉曼峰吻合^[5-6],如图2中a谱线所示。昌化紫溪鸡血石样品CD和桂林鸡血石样品GL的“血”的拉曼光谱与样品CA、CB、CC和GZ的拉曼光谱不同,具有224,243,291,410,496和611 cm^{-1} 的拉曼峰,这与赤铁矿($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)的拉曼峰吻合^[7-8],分别如图2中b谱线和c谱线所示。另外,桂林鸡血石“血”的拉曼光谱中出现明显的位于125,204,264,354和464 cm^{-1} 的石英的特征拉曼峰,这与赤铁矿分布于石英基质中有关。

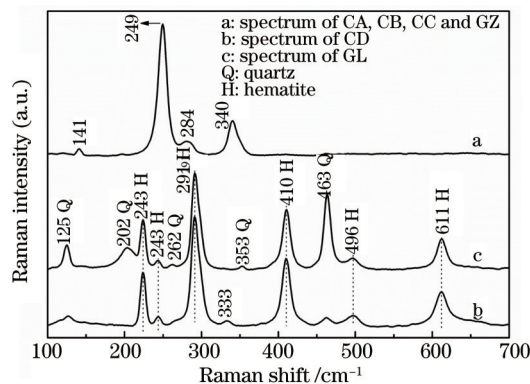


图2 不同鸡血石“血”的拉曼光谱

Fig.2 Raman spectra of “blood” of different chicken-blood stones

3.2 各鸡血石样品“地”的拉曼光谱

6个样品“地”[图1(a)~(f)标有2处]的显微拉曼光谱测试结果如图3所示。

样品CA“地”的拉曼光谱具有125,204,264,354,391,402,464和1160 cm^{-1} 的拉曼峰,最强拉曼峰位于464 cm^{-1} ,与石英的拉曼峰吻合^[9-11],即样品CA“地”的主要矿物成分是石英。样品CA“地”的石英矿物呈灰白、暗灰色,应该是一种经风华淋滤和热液交代迭加形成的次生石英岩^[12],隐晶质结构,常含有石英斑晶[例如图1(a)中标有4处]、黄铁矿[例如图1(a)中标有3处]等矿物。

样品CB“地”的拉曼光谱如图3(b)所示。其中,位于161,234,345,381,484,508,560,652,1025,1077,1152和1186 cm^{-1} 的拉曼峰与明矾石的拉曼峰吻合^[13-14];除去明矾石的拉曼峰,另外3个位于125,204和464 cm^{-1} 的拉曼峰应该是石英的3个最强拉曼峰。样品CB是一种以明矾石为主并含有少量石英的鸡血石,不含地开石和高岭石,这与戴慧等^[15]的研究结果一致。

样品CC“地”的拉曼光谱如图3(c)所示。其中,位于118,128,141,195,243,267,336,433,459,506,637,748,795和916 cm^{-1} 的拉曼峰归属于高岭石族粘土矿物^[16-18],主要矿物是地开石,次要矿物是高岭石;位于1024 cm^{-1} 的拉曼峰归属于硫酸根离子,说明该样品含有微量的明矾石。样品CC“地”呈灰色、灰白色,主要矿物成分为地开石,含有少量的高岭石和微量的明矾石,是一种弱明矾石化的以地开石为主的软地鸡血石^[11]。样品CC的“血”和“地”的矿物成分与国家标准一致。

样品CD“地”的拉曼光谱如图3(d)所示。位于118,128,195,243,267,336,433,459,748,795和916 cm^{-1}

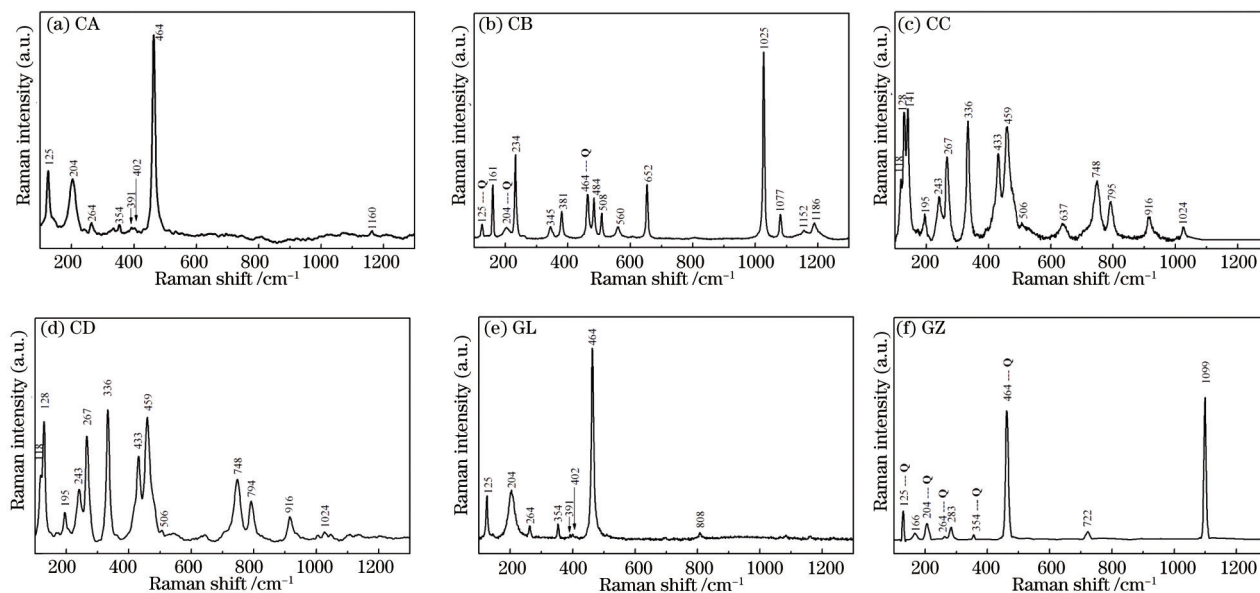


图3 不同鸡血石样品“地”的拉曼光谱

Fig.3 Raman spectra of Di of different chicken-blood stones

的拉曼峰与地开石的拉曼峰吻合^[16-18],且地开石的纯度非常高,无其他矿物的拉曼峰出现,仅有微弱的硫酸根基团位于1024 cm⁻¹处的拉曼峰。样品CD是一种含有大量赤铁矿、弱明矾石化的以高纯度地开石为主要矿物的鸡血石。

样品GL“地”的拉曼光谱如图3(e)所示。位于125,204,264,354,391,402和464 cm⁻¹的拉曼峰与石英的拉曼峰吻合^[9-11]。样品GL是一种呈白色、灰白色的硅质岩经区域变质作用和热液交代作用形成的铁质石英岩鸡血石^[19-21],其红色“血”为赤铁矿。

样品GZ“地”的拉曼光谱如图3(f)所示。其中,位于125,204,264,354和464 cm⁻¹的拉曼峰归属于石英^[9-11];位于166,283,722和1099 cm⁻¹的拉曼峰归属于碳酸根基团^[22-24]。样品GZ是产于白云岩和石灰岩的汞矿石,所含金属矿物主要是辰砂,脉石矿物主要是褪色重结晶形成的方解石,存在硅化、黄铁矿化和方解石化的蚀变现象^[25]。

3.3 具金属光泽的矿物

在样品CA、CB、CD和GZ的表面,存在具金属光泽的矿物[图1(a)、(b)、(d)、(f)中标有3处],对这些矿物进行激光显微拉曼光谱测试,测得的拉曼光谱一致,结果如图4所示。

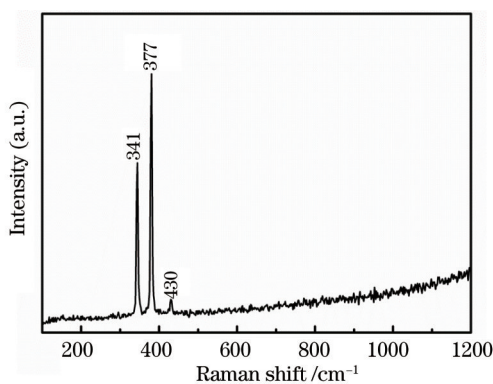


图4 具金属光泽的矿物的拉曼光谱

Fig.4 Raman spectrum of mineral with metallic luster

在100~1200 cm⁻¹范围内,具金属光泽的矿物有3个尖锐的拉曼峰,分别位于341,377和430 cm⁻¹,与黄铁矿的拉曼峰吻合^[26],即各个样品表面具金属光泽的矿物为黄铁矿(FeS₂)。

3.4 无色晶体

样品 CA[图 1(a)中标有 4 处]和 CC[图 1(c)标有 3 处]的表面有几处大小不一的无色、透明至半透明晶体,晶体的横断面呈六边形,测得的拉曼光谱如图 5 所示。

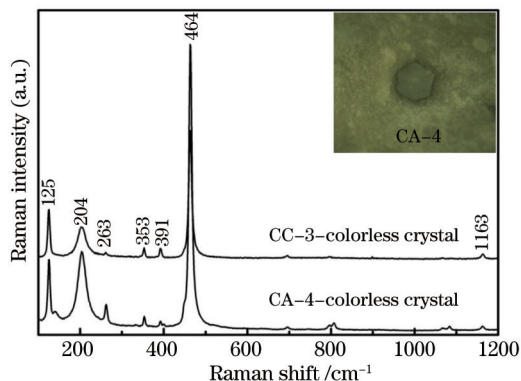


图 5 无色晶体的拉曼光谱

Fig.5 Raman spectra of colorless crystals

无色晶体的拉曼光谱具有位于 125, 204, 264, 353, 391 和 464 cm^{-1} 等处的拉曼峰,与石英的拉曼峰吻合^[9-11],即无色晶体为晶体形态较完好的石英。

3.5 样品 GZ 表面的白色脉状矿物

贵州鸡血石样品 GZ 的表面有多处脉状和团块状白色矿物,测得的拉曼光谱如图 6 所示。

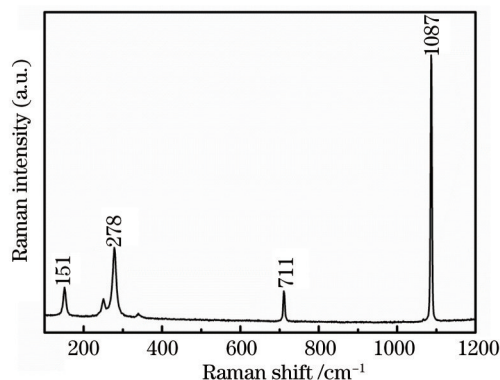


图 6 样品 GZ 白色脉状矿物的拉曼光谱

Fig.6 Raman spectrum of white mineral of sample GZ

白色矿物具有位于 1087, 711, 278 和 151 cm^{-1} 处的拉曼峰,与方解石的特征拉曼峰吻合^[22,27],即这些白色脉状矿物是样品经褪色重结晶形成的方解石^[25]。

4 X 射线衍射分析

取每块样品的“地”研磨压片进行 X 射线粉晶衍射分析,所得结果如图 7 所示。据图 7 分析可知,样品 CA 的主要矿物成分是石英,另外,在 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 之间有 2 个衍射峰无法确定归属;样品 CB 的主要矿物成分是明矾石和石英;样品 CC 的主要矿物成分是地开石,可能含有少量高岭石和珍珠陶石;样品 CD 的矿物成分主要是地开石和石英,还有少量的赤铁矿;样品 GL 的主要矿物成分是石英;样品 GZ 的矿物成分主要是石英和碳酸盐矿物(白云石)。X 射线粉晶衍射的结果与激光显微拉曼光谱测试所得结果一致。

5 结果与讨论

拉曼光谱是近代迅速发展起来的物理谱学分析技术,是基于光的非弹性散射,通过作用提供分子振动的相关信息,可以反映物质分子级别的特征。不同的珠宝玉石由于分子组成不同,结构不同,其拉曼峰的特征也不同,据此可以对测试样品的组成成分和晶体结构进行表征,获取有用信息,达到测定、鉴别各种珠宝

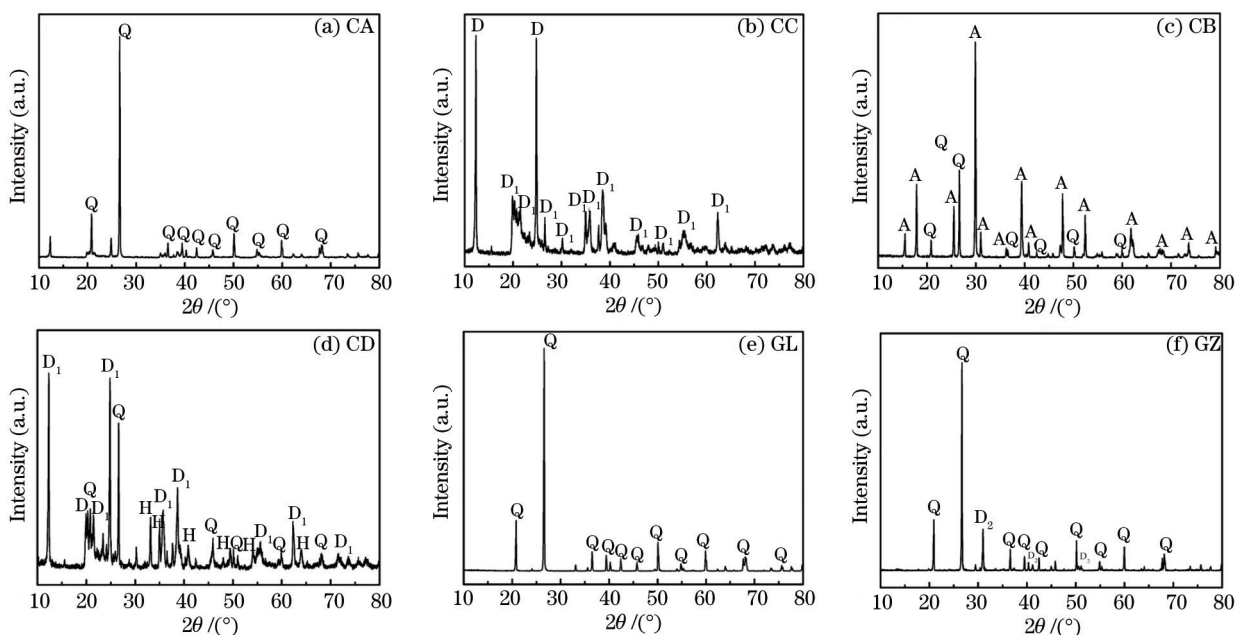


图 7 各样品 X 射线粉晶衍射图谱(Q: 石英, A: 明矾石, D: 地开石, H: 赤铁矿, D₂: 白云石)

Fig.7 X-ray diffraction spectra of all samples (Q: quartz, A: alunite, D₁: dickite, H: hematite, D₂: dolomite)

玉石的目的。相对于 X 射线粉晶衍射和红外光谱等仪器,激光显微拉曼光谱仪具有极高的空间分辨率(2 μm)和灵敏度,在鸡血石的无损鉴定中具有显著的优势,能够对检测样品局部微区的矿物成分和结构进行针对性较强的测试和分析,为检测和鉴定提供科学、可靠的数据。激光显微拉曼光谱仪在现代检测和鉴定中具有方便快捷、精确可靠、针对性强、分辨率高和无损等显著优势^[28-31]。但是,当样品具有荧光时,激光显微拉曼光谱仪的应用会受到一定限制。

根据激光显微拉曼光谱测试结果分析得知所研究的 6 块鸡血石样品的矿物成分比较复杂。鸡血石样品 CA、CB、CC 和 GZ 的“血”都是辰砂,而样品 CD 和 GL 的“血”是赤铁矿;样品 CA 和 GL “地”的矿物成分是纯度较高的石英;样品 CB “地”的矿物成分主要是明矾石,并含有少量的石英;样品 CC 的“地”是高岭石族粘土矿物,主要矿物为地开石,次要矿物为高岭石,与国家标准中鸡血石“地”的矿物成分一致;紫溪鸡血石样品 CD 的“地”是纯度非常高的地开石;样品 GZ “地”的矿物成分是白云岩、石灰岩一类的矿物,并存在硅化、黄铁矿化和方解石化的蚀变现象。

样品 CA、CB、CD 和 GZ 表面的具金属光泽矿物,样品 CA 和 CC 表面的无色透明晶体,反映了这些鸡血石样品“地”存在着黄铁矿化、硅化等蚀变现象;样品 GZ 表面的脉状、团块状方解石矿物,反映了该样品的“地”经历过褪色重结晶过程。这些矿物对鸡血石样品的鉴定及其地质成因、地质环境的分析有一定的辅助作用,值得注意和进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Li Ping, Zhou Yuegang. The mineral composition and rock species of common ground of Changhua chicken-blood stones [J]. Shanghai Geology, 2007, (3): 59-62.
李 平, 周越刚. 昌化鸡血石常见地子的成分与岩性[J]. 上海地质, 2007, (3): 59-62.
- 2 Chen Tao, Yan Xuejun, Lu Wei, et al.. Gemmological study on chicken-blood stone from Changhua [J]. Journal of Gems and Gemmology, 2009, 11(2): 7-19.
陈 涛, 严雪俊, 鲁 纬, 等. 昌化鸡血石的宝石学研究[J]. 宝石和宝石学杂志, 2009, 11(2): 7-19.
- 3 Chi Guangcheng, Wang Na, Wu Tong. X-ray powder diffractometric identification of chicken-blood stones [J]. Rock and Mineral Analysis, 2010, 29(1): 71-73.
迟广成, 王 娜, 吴 桐. X 射线粉晶衍射仪鉴别鸡血石[J]. 岩矿测试, 2010, 29(1): 71-73.
- 4 Liu Weidong. Identifying natural chicken-blood stone from its imitation by Raman spectrum [J]. Journal of Gems and Gemmology,

- 2003, 5(3): 24–26.
刘卫东. 利用拉曼光谱鉴别鸡血石及其仿制品[J]. 宝石和宝石学杂志, 2003, 5(3): 24–26.
- 5 R L Frost, H G M Edwards. Raman spectroscopic and SEM study of cinnabar from Herod's palace and its likely origin [J]. *Analyst*, 2002, 127(2): 293–296.
- 6 R J H Clark, P J Gibbs. Non-destructive *in situ* identification of cinnabar on ancient Chinese manuscripts [J]. *J Raman Spectrosc*, 1997, 28: 91–94.
- 7 D L A de Faria, S Venancio Silva, M T Oliveira. Raman microspectroscopy of some iron oxides and oxyhydroxides [J]. *J Raman Spectrosc*, 1997, 28: 873–878.
- 8 Liu Zhaojun, Han Yunxia, Yang Rui, *et al.*. Micro-Raman analysis of the pigments in the mural paintings from a Ming dynasty tomb [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0615003.
刘照君, 韩运侠, 杨蕊, 等. 明代古墓葬壁画颜料的显微拉曼光谱分析[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0615003.
- 9 P F McMillan, G H Wolf, P Lambert. A Raman spectroscopic study of shocked single crystalline quartz [J]. *Phys Chem Minerals*, 1992, 19(2): 71–79.
- 10 M Yoshikawa, K Iwagami, N Morita, *et al.*. Characterization of fluorine-doped silicon dioxide film by Raman spectroscopy [J]. *Thin Solid Films*, 1997, 310(1–2): 167–170.
- 11 M Ostroumova, E Faulquesb, E Lounejevac. Raman spectroscopy of natural silica in Chicxulub impactite, Mexico [J]. *Comptes Rendus Geosci*, 2002, 334(1): 21–26.
- 12 Liang Xiumu, Mao Shunli, Zhu Liangen. The origin classification and prospecting significance of silicified cap [J]. *Geology of Zhejiang*, 1998, 14(1): 18–22.
梁修睦, 毛顺利, 朱连根. “硅化带(帽)”成因、分类及找矿意义[J]. 浙江地质, 1998, 14(1): 18–22.
- 13 N Maubec, A Lahfid, C Lerouge, *et al.*. Characterization of alunite supergroup minerals by Raman spectroscopy [J]. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, 2012, 96: 925–939.
- 14 Wang Cuizhi, Xiong Xin. Raman spectra characteristics of alunite in the Zijinshan gold-copper deposit [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(2): 415–420.
王翠芝, 熊欣. 紫金山金铜矿明矾石的拉曼光谱特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(2): 415–420.
- 15 Dai Hui, Zhang Qing, Jiang Xiaoping, *et al.*. Gemmological and mineralogical characteristics of chicken-blood stone of alunite and quartz “Di” from Changhua [J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 2011, 13(2): 27–30.
戴慧, 张青, 蒋小平, 等. 昌化明矾石石英地鸡血石的宝石矿物学特征[J]. 宝石和宝石学杂志, 2011, 13(2): 27–30.
- 16 C T Johnston, J Helsen, R A Schoonheydt, *et al.*. Single-crystal Raman spectroscopic study of dickite [J]. *Am Mineral*, 1998, 83: 75–84.
- 17 R L Frost, T H Tran, L Rintoul, *et al.*. Raman microscopy of dickite, kaolinite and their intercalates [J]. *Analyst*, 1998, 123: 611–616.
- 18 K H Michaelian. The Raman spectrum of kaolinite #9 at 21°C [J]. *Can J Chem*, 1986, 64: 285–294.
- 19 Huang Haibo. Geochemistry of silicalite in upper proterozoic subera in Longsheng County, Guangxi [J]. *Guangxi Geology*, 1995, 8(1): 31–38.
黄海波. 广西龙胜晚元古代硅质岩的地球化学特征[J]. 广西地质, 1995, 8(1): 31–38.
- 20 Zhong Ziyun, Gong An, Fang Jiyi. Geological characteristic and tectonic environments of the ophiolite zone at Longsheng district, Guangxi [J]. *Acta Petrologica Mineralogical et Analytica*, 1983, 2(1): 1–9.
钟自云, 龚安, 方积以. 广西龙胜蛇绿岩带的地质特征及构造环境[J]. 岩石矿物及测试, 1983, 2(1): 1–9.
- 21 Liu Chun. Gemmological characteristics of Guilin “chicken-blood-red jasper” [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2010, 30(2): 223–228.
刘纯. 桂林“鸡血红碧玉”的玉石学特征[J]. 桂林理工大学学报, 2010, 30(2): 223–228.
- 22 H N Rutt, J H Nicola. Raman spectra of carbonates of calcite structure [J]. *J Phys C Solid State Phys*, 1974, 7(24): 4522–4528.
- 23 D Krishnamurti. Raman spectrum of magnesite [J]. *Proc Indian Acad Sci*, 1956, 43(4): 210–212.
- 24 J H Nicola, J F Scott, R M Couto, *et al.*. Raman spectra of dolomite [CaMg(CO₃)₂] [J]. *Phys Rev B*, 1976, 14(10): 4676–4678.
- 25 Zhou Dezhong, Mao Jianquan, Yang Guozhen. The classification of structural domains and structural zones of mercury ore deposits in Guizhou Province [J]. *Mineral Deposits*, 1982, 1(1): 43–50.
周德忠, 毛健全, 杨国桢. 贵州省汞矿构造域与汞矿带的划分[J]. 矿床地质, 1982, 1(1): 43–50.

- 26 T P Mernagh, A G Trudu. A laser Raman microprobe study of some geologically important sulphide minerals [J]. Chem Geol, 1993, 103: 113-127.
- 27 J M Sun, Z G Wu, H F Cheng, *et al.*. A Raman spectroscopic comparison of calcite and dolomite [J]. Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc, 2014, 117: 158-162.
- 28 Xue Haipeng, Lu Wenzhuang, Sun Dafei, *et al.*. Raman spectroscopy of nanocrystalline vapor deposition diamond [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0707002.
薛海鹏, 卢文壮, 孙达飞, 等. 纳米化学气相沉积金刚石的拉曼光谱[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0707002.
- 29 Shi Lingyun, Guo Shouguo, Wang Yiqun. Study on spectral characteristics of black saltwater pearls and treated black pearls [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(6): 063002.
史凌云, 郭守国, 王以群. 黑色海水珍珠和人工处理黑珍珠的光谱学特征研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(6): 063002.
- 30 Ye Yuhuang, Chen Yang, Li Yongzeng, *et al.*. Discrimination of nasopharyngeal carcinoma and normal nasopharyngeal cell based on confocal Raman microspectroscopy [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0504003.
叶宇煌, 陈 阳, 李永增, 等. 基于拉曼光谱的鼻咽癌与正常鼻咽细胞株的分类研究[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0504003.
- 31 Dong Jingjing, Chen Juan, Ge Yanru, *et al.*. Nondestructive identification of panax notoginseng and its analogues via laser Raman spectroscopy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 053002.
董晶晶, 陈 娟, 戈延茹, 等. 激光拉曼光谱法无损鉴别三七及其伪品[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 053002.

栏目编辑: 吴秀娟