

地开石型“老挝石”的矿物学特征

陈淑玲¹, 王朝文², 许焕玲³, 陈涛², 殷科¹, 韩文⁴, 洪汉烈¹

(1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学珠宝学院, 湖北 武汉 430074; 3. 广东省金银珠宝检测中心, 广东 广州 510080; 4. 国土资源部珠宝玉石首饰管理中心北京珠宝研究所, 北京 100013)

摘要:“老挝石”与寿山石外观极其相似,但是价格低廉且产量巨大,给寿山石的交易市场带来了严重的冲击。利用偏光显微镜、X射线粉晶衍射仪、傅里叶红外光谱仪、拉曼光谱仪、扫描电子显微镜、电子探针针对“老挝石”的矿物学特征进行了详细的分析。结果表明:(1)不同颜色的“老挝石”主要矿物组成相同,以地开石(2M1型)为主,含有少量珍珠陶石和高岭石,地开石整体结晶程度差,偶见假六方片状,颗粒大小不一;(2)扫描电子显微镜和拉曼光谱显示,“老挝石”中次要矿物有赤铁矿、金红石、长石和硫磷铝锶石。老挝石中大部分赤铁矿结晶形态良好,呈现四边形或者六边形的结晶外形,少量赤铁矿呈浸染状包围形态规则的赤铁矿、长石,或分布在裂隙中,颜色富集,红色调加深,“老挝石”中“萝卜纹”的光泽、透明度与基质不同,呈现网脉状分布,矿物成分为硫磷铝锶石;(3)电子探针结果表明,红色“老挝石”中Fe质量分数较高,浸染状赤铁矿可能是导致“老挝石”呈现红色的主要原因。

关键词:“老挝石”;地开石;高岭石;“萝卜纹”

中图分类号: TS93

文献标识码: A

文章编号: 1008-214X(2018)04-0001-09

DOI: 10.15964/j.cnki.027jgg.2018.04.001

Mineralogical Characteristic of “Laos Stone” with Main Mineral Component Dickite

CHEN Shuling¹, WANG Chaowen², XU Huanling³, CHEN Tao², YIN Ke¹,
HAN Wen⁴, HONG Hanlie¹

(1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Gemmological Institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

3. Guangdong Provincial Jewelry Testing Center, Guangzhou 510080, China;

4. National Gems & Jewelry Technology Administrative Center, Beijing 100013, China)

Abstract: “Laos stone” is very similar to “Shoushan stone” in appearance. However, the price of “Laos stone” is much lower than that of “Shoushan stone” since its large production, which has brought a severe impact to the market of “Shoushan stone”. Optical microscope,

收稿时间: 2018-04-05

基金项目: 国家重点研发计划资助(2018YFF0215403), 中国地质大学(武汉)珠宝学院科研基金(CIGTXM-201603, CIGTXM-201530), 国家自然科学基金青年科学基金(41602037)

作者简介: 陈淑玲(1993—), 女, 主要从事矿物学、岩石学、矿床学研究。

通讯作者: 陈涛(1979—), 女, 教授, 主要从事粘土矿物学和宝石学的教学和研究工作。E-mail: summerjewelry@163.com

Fourier transform infrared spectrometer (FTIR), X-ray diffraction (XRD), laser Raman spectroscopy (LRM), scanning electron microscopy (SEM) and electron probe micro analysis (EPMA) were applied to study its mineralogical characteristics. The XRD results showed that the main mineral component of samples in different colour (red, black and white) is dickite (type 2M1). The crystallinity of dickite is poor, while some dickites forming hexagonal-plate with different sizes. Minor nacrite and kaolinite are also detected. SEM and LRM testing results revealed secondary mineral components in "Laos stone" include hematite, rutile, svanbergite and feldspar. Svanbergite is the main composition of "radish striae" and occurs in fragments or net veins, whose transparency and luster are different from the basic part of "Laos stone". The EPMA result showed that the Fe is enriched in the red "Laos stone". A majority of hematite shows good crystallinity with tetragon and hexagon appearance. The hematite being disseminated structures commonly surrounds the hematite crystal or distributes in the cracks of "Laos stone" and deepens the red colour.

Key words: "Laos stone"; dickite; kaolinite; "Radish striae"

寿山石、青田石、昌化石和巴林石是中国四大图章石,自古以来深受中国人的追捧与喜爱,代表中国的传统文化。其中寿山石产于福建省福州市晋安区寿山乡寿山村、日溪乡汶洋村等地^[1],素有“国之瑰宝”“石之君子”的美誉。“老挝石”外观特征与寿山石的某些品种外观高度相似,产量丰富,价格低廉,2014年进入市场后对寿山石的交易产生巨大冲击^[2]。如何有效地鉴别“老挝石”是当前亟待解决的关键问题。

目前,“老挝石”的研究仍处于起步阶段。汤德平等^[2]对“老挝石”的外观特征、矿物种类和结构进行了研究,认为“老挝石”主要由高岭石族矿物(高岭石、地开石和珍珠陶石)组成,不同颜色“老挝石”主要矿物组成不同。以高岭石为主的“老挝石”多为红色系,透明度较差;以较有序的地开石为主要矿物组成的“老挝石”颜色较浅,多为白色,透明度较高;主要矿物组成为珍珠陶石的“老挝石”多为白色,透明度较好^[2]。王含等^[3]和韩文等^[4]对“老挝石”矿物组成和致色机理研究认为,“老挝石”主要矿物组成为地开石,其红色调与赤铁矿含量正相关,但研究并未表明其红色调是与粗粒赤铁矿还是浸染状赤铁矿相关。刘云贵,肖珊等研究^[1, 5-7]认为,“老挝石”与寿山石(芙蓉石除外)的主要矿物组成非常相似。前人对“老挝石”的研究集中在外观特征、矿物组成和颜色成因方面,但是关于“老挝石”中与寿山石相似的“萝卜纹”并没有受到关注。

采用偏光显微镜、X射线粉末衍射仪、傅里叶红外光谱仪、激光拉曼光谱仪、扫描电子显微镜

(SEM)、电子探针多种分析测试手段,全面深入地了解“老挝石”矿物组成、显微形貌、化学成分和谱学特征,为其鉴定提供理论依据。

1 样品与测试方法

1.1 样品基本特征

选择9件不同颜色和质地的代表性“老挝石”样品,如图1。“老挝石”样品整体或局部颜色包括红色、黄褐色、黄色、橙色、浅灰色、灰白色、乳白色、白色和黑色;质地由粗颗粒到细腻不等,透明度为微透明至不透明。对“老挝石”样品 LW-1—样品 LW-5 进行宝石学常规测试,折射率为1.53~1.56(点测);采用静水称重法每个样品测量3次相对密度取其平均值,得到样品相对密度为2.59~2.79(表1)。

1.2 测试方法

X射线粉末衍射、扫描电子显微镜、电子探针分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。X射线粉末衍射分析测试条件:电压40 kV,电流40 mA, CuK α 靶,扫描速度0.4°/s,扫描步长0.0167°,测量范围3°~65°。扫描电子显微镜使用 QUANTA 200 型环境扫描电子显微镜,测试条件:电压20 kV,电流1~3 nA,能谱仪束斑大小3.0 μ m。电子探针分析利用配备4道波谱仪的 JEOL JXA-8100 电子探针完成,测试条件:加速电压15 kV,加速电流20 nA,束斑直径1 μ m,所有测试数据均进行了 ZAF 校正处理。

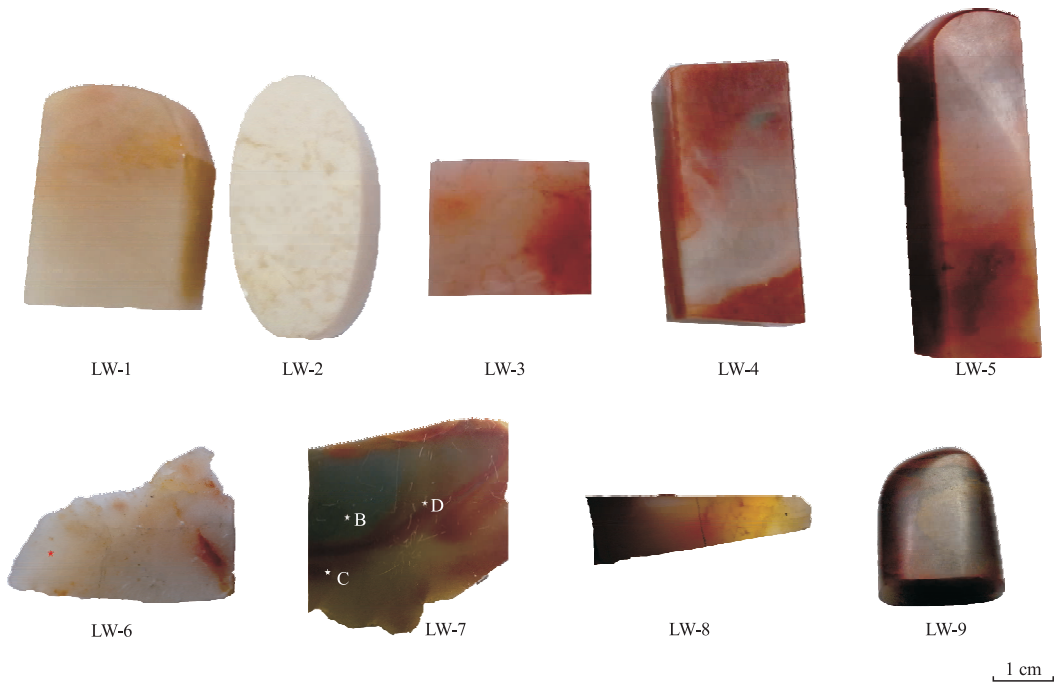


图1 “老挝石”样品

Fig. 1 “Laos stone” samples

表1 “老挝石”样品的基本特征

Table 1 Basic characteristics of “Laos stone” samples

样品	颜色	光泽	透明度	折射率 (点测)	相对 密度	特征
LW-1	黄褐色、 浅灰色	蜡状 光泽	微透明	1.56	2.789	质地细腻,有透明的水线
LW-2	乳白色	蜡状 光泽	半透明	1.56	2.699	质地较粗,半透明与透明处无明显界限,颗粒感明显
LW-3	浅粉红色	油脂 光泽	透明	1.54	2.605	质地细腻,可见红色和黑色点状物质分布,类似“桃花冻”
LW-4	红色、 灰白色	油脂 光泽	微透明	1.54	2.594	红色部分呈丝脉状,部分有极细小的颗粒感,黑色杂质点状分散,内部有四边形透明物质
LW-5	红色、 黄色	油脂 光泽	微透明	1.54	2.613	质地细腻,红色艳丽,红色部分分布均匀、深入,有红色杂质呈点状分布,水线处透明度极高

红外光谱和激光拉曼光谱测试在中国地质大学(武汉)珠宝学院完成。红外光谱测试采用KBr压片法,取不同颜色“老挝石”粉末样品与KBr以1:100比例充分研磨、混合均匀,制成透明状的压片,测试条件:分辨率 4 cm^{-1} ,扫描64次,扫描范围 $400\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ 。激光拉曼光谱测试条件:激发光源 532 nm ,扫描时间 30 s ,叠加3次,采用共聚焦模式,激光束斑直径为 $50\times 1\,000\ \mu\text{m}$,输出功率 20 mW 。薄片扫描时间 3 s ,叠加10次,其他条件相同。

2 测试结果及讨论

2.1 “老挝石”的主要矿物

2.1.1 X射线粉末衍射分析

选取不同颜色(白色、黑色、红色)“老挝石”样品(LW-6A, LW-7B, LW-7C)进行X射线粉末衍射分析测试,得到不同颜色“老挝石”样品的主要矿物为高岭石族矿物,包括高岭石、地开石和珍珠陶石3种多型矿物。高岭石族各种多型矿物主要根据 2θ 为 $19^\circ\sim 24^\circ$ 和 $34^\circ\sim 40^\circ$ 之间的衍射峰鉴

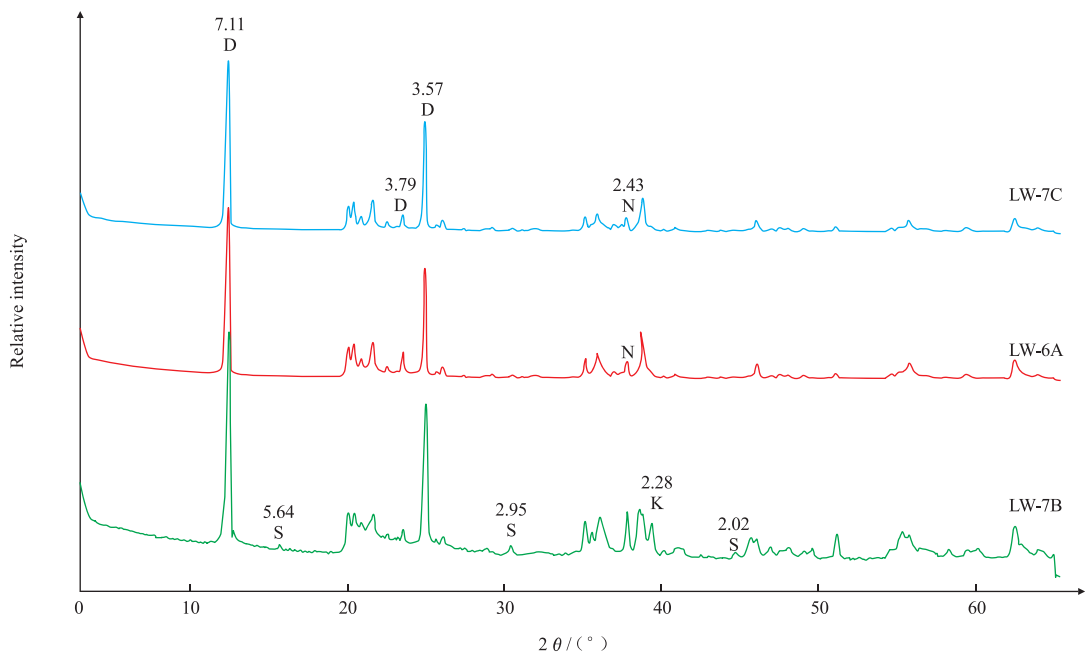


图2 “老挝石”样品的X射线粉末衍射图

Fig. 2 XRD pattern of white, black, and red part of “Laos stone” samples

LW-6A. 白色样品; LW-7B. 黑色样品; LW-7C. 红色样品

D. 地开石; K. 高岭石; S. 硫磷铝锶石; N. 珍珠陶石

别^[8, 9]; $19^{\circ}\sim 24^{\circ}$ 之间,地开石具有 $3.95, 3.79 \text{ \AA}$ 处的特征衍射峰,而珍珠陶石和高岭石不具备该特征峰;在 $34^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 之间,地开石具有 4 个衍射峰,而高岭石和珍珠陶石分别具有 6 个和 5 个衍射峰。XRD 测试结果(图 2)表明,不同颜色的“老挝石”样品中主要矿物组成均为地开石,含有少量高岭石和珍珠陶石。3 种白色,黑色和红色颜色粉末均出现高岭石 2.28 \AA 处的衍射峰。“老挝石”样品 LW-6A 白色和样品 LW-7C 红色粉末中 2θ 为 $37^{\circ}\sim 38^{\circ}$ 出现了珍珠陶石 2.43 \AA 处的特征峰,指示少量珍珠陶石的存在。同时,在“老挝石”样品 LW-7B 黑色粉末中,还检测到少量的硫磷铝锶石 $5.64, 2.95, 2.02 \text{ \AA}$ 处的特征组合峰,可知该样品中含有硫磷铝锶石。

2.1.2 红外光谱分析

红外光谱可以有效地鉴别高岭石族矿物的多型,高岭石族矿物红外吸收光谱的指纹区谱峰差别很小,但在官能团区,OH 振动峰的位置、相对强弱和分裂程度区别明显,可以准确地区别高岭石族矿物的多型。为进一步验证 XRD 结果,对不同颜色“老挝石”样品粉末进行红外吸收光谱测试。

结果(图 3)显示,所有“老挝石”样品在官能团区 $3700\sim 3600 \text{ cm}^{-1}$ 左右均存在 3 个明显吸

收峰,位于 $3704, 3656, 3624 \text{ cm}^{-1}$ 。“老挝石”样品 LW-6A 和样品 LW-7D 随着波数降低,吸收强度增大,分裂明显,与地开石的红外特征一致。“老挝石”样品 LW-7B 在该区呈现 4 个明显吸收峰 $3698, 3669, 3652, 3620 \text{ cm}^{-1}$,且吸收两端强、中间弱,与高岭石的红外特征一致^[10, 11]。“老挝石”样品 LW-7C 在此范围内有 3 个吸收峰,其中 $3656, 3624 \text{ cm}^{-1}$ 处振动峰吸收强度相近、分裂较差,吸收强度高于 3700 cm^{-1} 左右的吸收峰,显示为珍珠陶石的红外峰^[9]。与“老挝石”样品 LW-6A 和 LW-7D 相比,“老挝石”样品 LW-7B 的 3700 cm^{-1} 左右的峰位向低波数移动,可能与地开石有序-无序状态相关^[9]。“老挝石”样品 LW-7B 和 LW-7C 在官能团区 $3700\sim 3600 \text{ cm}^{-1}$ 区间分裂较差,且中间吸收峰的强度弱于两边,可能是样品中含有地开石-高岭石或者地开石-珍珠陶石的过渡矿物^[1]。

2.2 “老挝石”中的次要矿物

2.2.1 拉曼光谱分析

拉曼光谱和扫描电子显微镜可以进行微区测试得到杂质矿物的振动峰和能谱,可以很好地反映“老挝石”中的次要矿物组成。

在显微镜下观察到样品 LW-7 中一部分矿物具有强金属光泽,分布形式有两种:一种是规则的

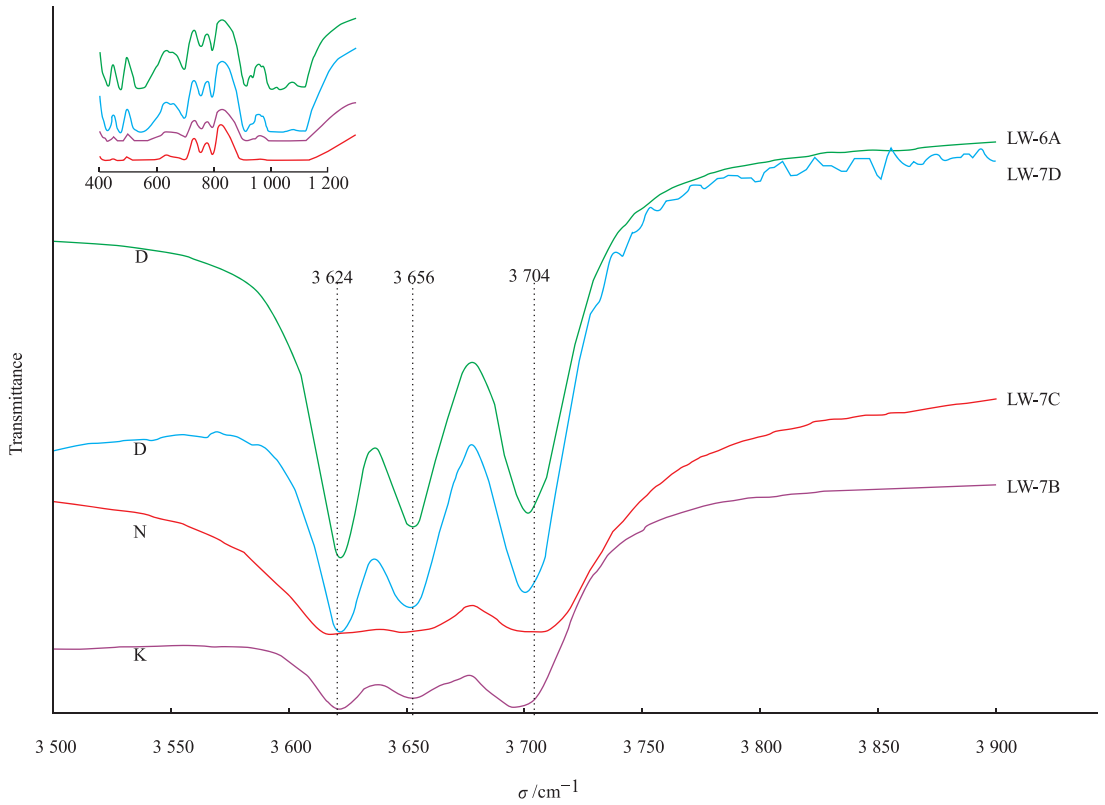


图 3 “老挝石”样品的红外光谱

Fig. 3 Infrared spectra of “Laos stone” samples

LW-6A. 白色样品; LW-7B. 黑色样品; LW-7C, LW-7D. 红色样品
 D. 地开石; K. 高岭石; N. 珍珠陶石

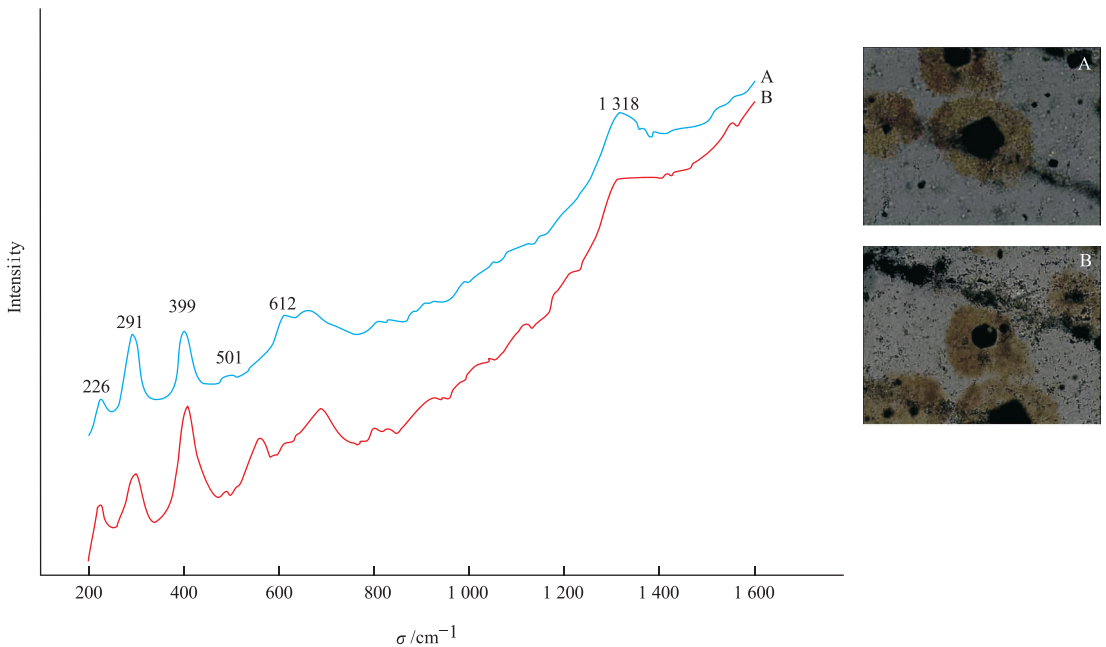


图 4 “老挝石”样品 LW-7 中包裹体 A、B 的拉曼光谱

Fig. 4 Raman spectra of inclusion A and inclusion B of “Laos stone” sample LW-7

金属矿物颗粒,呈现四边形和六边形两种形态;另一种是不规则的金属矿物,呈浸染状分布在金属矿物颗粒周围。对四边形、六边形金属矿物颗粒进行拉曼光谱测试,结果(图4)显示,该矿物在226、291、399、501、612、1 318 cm^{-1} 处具有赤铁矿的特征振动谱峰^[12]。

2.2.2 扫描电子显微镜能谱测试

在扫描电子显微镜下观察到“老挝石”样品 LW-7 中有少量规则的四方形矿物(图5a)以及规则的六边形矿物(图5b),其灰度与基质差别很大。能谱测试结果得到四边形矿物(图5a)含有 Na、Al、Si、Ca、Cr、K、O、Cl 等元素,推测矿物为钾

钠系列长石。地开石一般为长石的蚀变产物^[13],推测“老挝石”在形成过程中可能经历了强烈的蚀变作用。能谱测试显示六边形矿物(图5b)为赤铁矿,只含 Fe、O 元素,与拉曼光谱中测得的赤铁矿结果一致。图5c 杂质矿物无规则形态,且只含 Ti、O 元素,说明“老挝石”中含有金红石。

“老挝石”样品 LW-8 中出现透明度较差的网状物质“萝卜纹”,呈现撕裂状或者丝状^[14]。对样品该处制成探针片,利用扫描电子显微镜能谱测试进行了进一步的确认,结果(图5d)显示,该矿物由 Al、Si、P、S、Sr 元素组成,为硫磷铝锶石, $\text{SrAl}_3(\text{PO}_4, \text{SO}_4)_2(\text{OH})$ 。

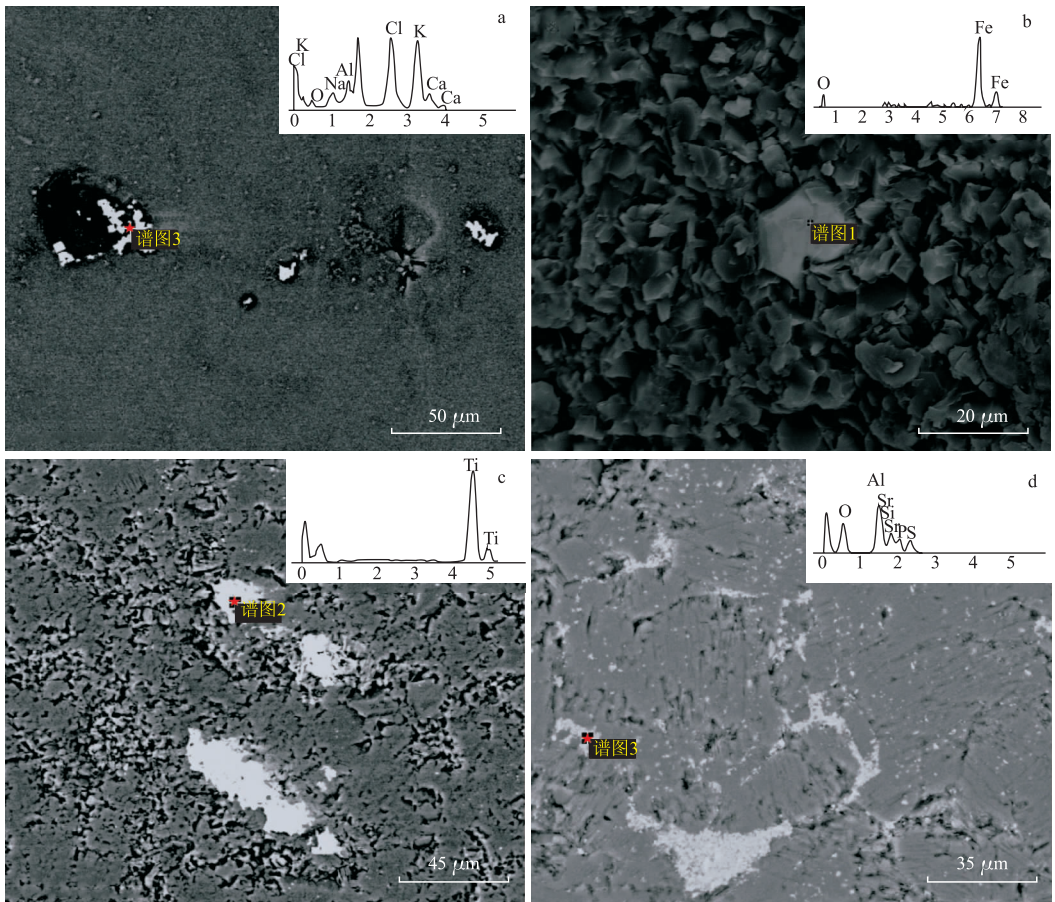


图5 “老挝石”样品 LW-7 (a, b)和样品 LW-8 (c, d)中次要矿物的扫描电子显微镜微形貌与能谱图:

a. 长石;b. 赤铁矿;c. 金红石;d. “萝卜纹”处显示硫磷铝锶石

Fig. 5 Micro-morphology and chemical compositions of minor minerals;

a. feldspar;b. hematite; c. rutile; d. “Radish striae”, svanbergite

2.3 “老挝石”岩石组构和微形貌

2.3.1 偏光显微镜观察

偏光显微镜下,样品 LW-7 中大量红褐色物质(图6a,6b)呈现浸染状分布,无规则形态。当

红褐色物质以脉状形式分布时,聚集呈现暗褐色(图6a),推测可能是次生的铁质氧化物或者铁质氢氧化物后期进入“老挝石”中,并在裂隙处大量富集,颜色浓集。浸染状的红色物质可以包围规

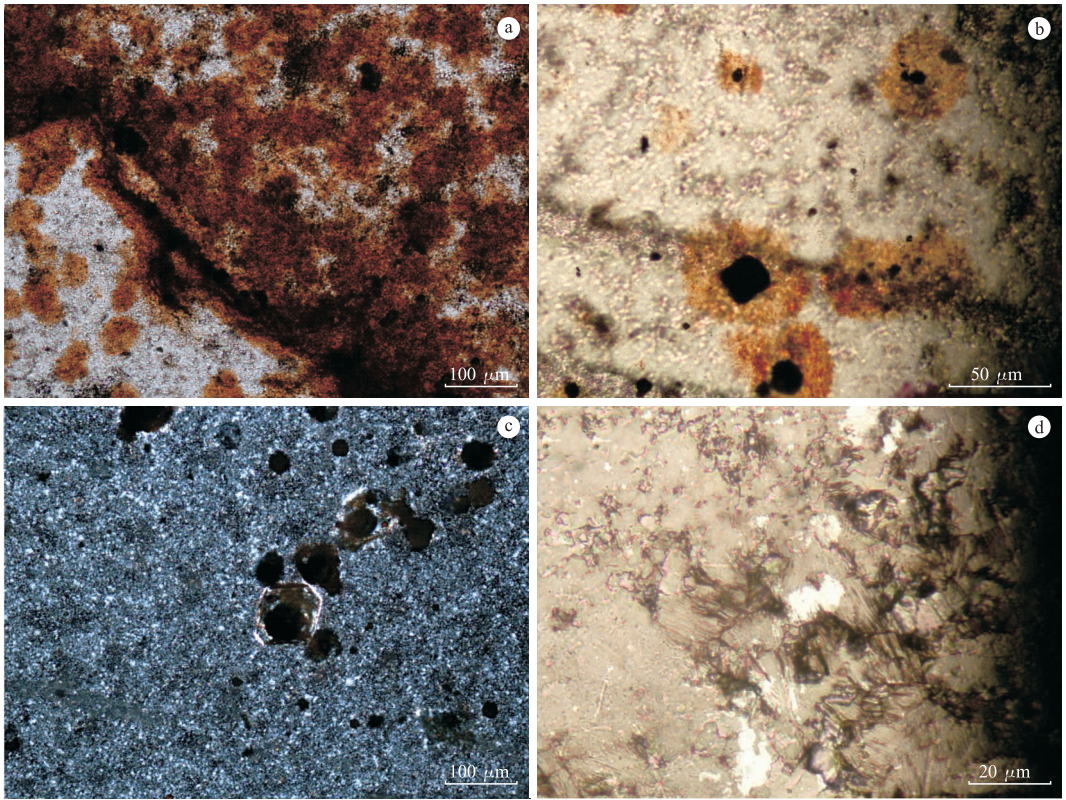


图6 显微镜下的“老挝石”样品 LW-7(a-c)和样品 LW-8(d);

a. 红褐色铁矿物呈现脉状分布 —; b. 具有规则形态的黑色矿物 —; c. 不同光泽的黑色矿物 +; d. 网脉状“萝卜纹” —

Fig. 6 “Laos stone” sample LW-7(a-c) and LW-8(d) observed by optical microscope:

a. vein-distributed red-brown iron minerals —; b. the well-crystallized black minerals —; c. black minerals with different luster +; d. the vein-like “radish striae” —

则的四边形、六边形的黑色不透明矿物(图 6b)。黑色矿物在反射光下有强的金属光泽,但光泽强度不同(图 6c),可能是两种不同的金属矿物。单偏光镜下样品 LW-8“萝卜纹”呈现黑色,基质为灰白色,可能是由于其透明度较差引起。“萝卜纹”形态不规则,无定向性,杂乱排列,呈网脉状分布(图 6d)。

2.3.2 扫描电子显微镜分析

选取黑色和红色相间的“老挝石”样品 LW-9,敲碎得到新鲜的断面,喷金后在扫描电子显微镜下观察微形貌。结果(图 7)显示,基质(地开石)为板状,大小不一,排列紧密处为隐晶致密集合体(图 7a)。地开石晶体呈现他形、半自形,部分晶形较好的可见层状六方板状结构(图 7b)。地开石粒径大小为几微米到十几微米不等。

在背散射电子衬度下观察,杂质矿物与基质

表现出明显不同的灰度(图 7c)。在二次电子成像下,部分金属矿物呈现规则的六边形(图 7d),根据扫描电子显微镜能谱测试结果(图 5b)发现其含 Fe、O 元素,进一步放大观察到“老挝石”中赤铁矿可见立方体穿插双晶的结构(图 7e)。在地质过程中,黄铁矿可以分解或者氧化形成磁黄铁矿、水铁矿、磁铁矿、针铁矿、赤铁矿等,但往往依黄铁矿晶形形成假象^[15],因此推测“老挝石”中部分赤铁矿可能由黄铁矿转化而来。

“萝卜纹”处与基质部分的地开石的排列方式不同,“萝卜纹”处主要是网脉状集合体(图 7f,图 7g),大部分颗粒细小,不具定向性,进一步放大观察“萝卜纹”内部,偶尔出现边界比较规则的大颗粒矿物(图 7h)。结合能谱测试的结果得到,该“萝卜纹”处成分为硫磷铝锶石(图 5d),与田黄中“萝卜纹”成分相同^[15]。

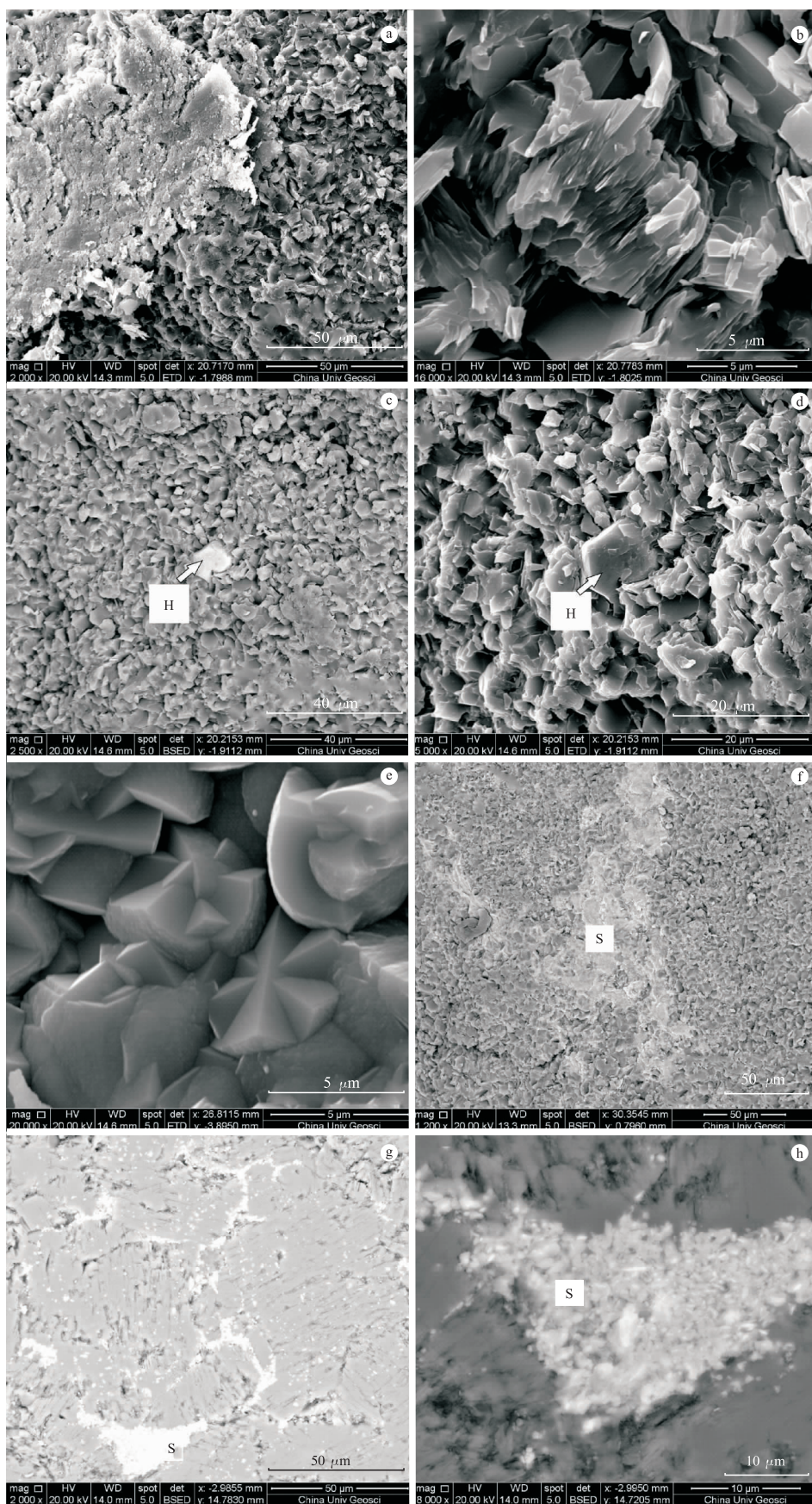


图7 扫描电子显微镜下“老挝石”样品的微形貌特征

Fig. 7 Micro-morphology of “Laos stone” samples

a, b. 地开石; c-e. 赤铁矿; f-h. “萝卜纹”; H. 赤铁矿; S. 硫磷铝锶石

2.4 “老挝石”的颜色分析

选取“老挝石”样品 LW-7 薄片不同颜色点位进行电子探针测试,发现红色、黄色、黑色处 Fe 的质量分数依次降低,白色点处不含 Fe 元素(表 2)。结合拉曼数据和显微镜下观察推测,Fe 元素来源于次生矿物赤铁矿。根据文献^[13],土壤中赤铁矿的存在会使得土壤呈现红色,在高山桃花石

中,其“红斑”也是由赤铁矿而产生。笔者推测,赤铁矿可能是红色“老挝石”的致色原因^[4]。结合单偏光显微镜下赤铁矿的形态特征,当赤铁矿呈集合体形态、浸染状分布于“老挝石”颗粒间(图 6a)，“老挝石”可以呈现红色。当赤铁矿结晶颗粒规则、粒度大时则可能形成红色的斑点,使得红色加深。

表 2 “老挝石”样品 LW-7 不同颜色处的电子探针测试结果

Table 2 EPMA results of different colour parts of “Laos stone” sample LW-7 $w_B/\%$

点位	Na ₂ O	K ₂ O	FeO _T	MgO	CaO	MnO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	Total
黑 1		0.028	0.007		0.005	0.002	37.951	0.011	0.001	49.116	87.121
黑 2		0.016	0.004	0.023	0.007	0.006	38.026	0.003	0.026	48.90	87.011
红 1	0.001		0.052			0.01	37.974			48.976	87.013
红 2		0.019	0.013	0.007	0.027		38.442			49.952	88.460
白 1	0.02	0.02			0.016	0.025	37.299			49.362	86.742
黄 1	0.003	0.009	0.013		0.008		37.934		0.027	50.275	88.269
红 3	0.014		0.002		0.004	0.003	37.362			49.075	86.460
红 4			0.013	0.004	0.026		38.414		0.043	50.225	88.725

3 结论

采用多种仪器对“老挝石”进行测试,得出以下结论。

(1)“老挝石”的主要矿物组成为地开石(2M₁型),含有少量珍珠陶石、高岭石;杂质矿物有赤铁矿、金红石、长石,“萝卜纹”的成分为硫磷铝锶石。

(2)扫描电子显微镜下观察到,“老挝石”的基质为板状晶体,少部分呈现半自形的六方板状,整体结晶程度差、定向性差,大小不一,粒径为几微米到十几微米。“老挝石”萝卜纹的矿物成分为硫磷铝锶石,“萝卜纹”呈碎屑状集合体或网脉状分布,大部分颗粒细小,且不具定向性。

(3)赤铁矿分布形式有两种:部分呈现浸染状分布,部分呈现规则的四边形或者六边形形态。浸染状赤铁矿包围规则的赤铁矿颗粒。在地开石形成后期铁质矿物进入,在矿物中富集,形成深褐色,推测是红色“老挝石”的致色原因。Fe 含量越高,红色越深。

方谦、刘艺苗、徐文静在实验和数据处理过程中给予帮助,在此表示感谢。

参考文献:

[1] 李婷,陈涛. 福建寿山高山石与坑头石的矿物学特征[J]. 岩

石矿物学杂志, 2010, 29(4): 414-420.

- [2] 汤德平,郑丹威,黄珊珊. “老挝石”的矿物组成及鉴别研究[J]. 宝石和宝石学杂志, 2015, 17(1): 1-9.
- [3] 王含,周征宇,钟倩,等. 电子微探针-X 射线衍射-扫描电镜研究老挝石岩石矿物学特征[J]. 岩矿测试, 2016, 35(1): 56-61.
- [4] 韩文,柯捷,陈华,等. 漫反射光谱在“老挝石”颜色成因上的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(8): 2 634-2 638.
- [5] 刘云贵. 田黄的宝石学和矿物学研究[D]. 武汉:中国地质大学, 2013.
- [6] 肖姗,陈涛. 寿山旗降石的宝石学矿物学研究[J]. 宝石和宝石学杂志, 2012, 14(3): 22-28.
- [7] 刘云贵,陈涛. 田黄的红外与拉曼光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(8): 2 143-2 146.
- [8] 汤德平,郑宗坦. 寿山石的矿物组成与宝石学研究[J]. 宝石和宝石学杂志, 1999, 1(4): 28-36.
- [9] 杨雅秀. 中国粘土矿物学[M]. 北京:地质出版社, 1994.
- [10] Johnston C T, Elzea Kogel J, Bish D L, et al. Low-temperature ftir study of kaolin-group minerals[J]. Clays & Clay Minerals, 2008, 56(4): 470-485.
- [11] Johnston C T. Polarized single-crystal Fourier-transform infrared microscopy of ouray dickite and keokuk kaolinite [J]. Clays & Clay Minerals, 1990, 38(6): 573-583.
- [12] 陈涛,唐亮亮,鲁伟,等. 福建寿山高山桃花石的颜色成因研究[J]. 宝石和宝石学杂志, 2008, 10(3): 1-3.
- [13] 董晋琨. 福建寿山石矿床的矿物学研究和成因分析[D]. 北京:中国地质大学, 2008.
- [14] 刘云贵,陈涛,韩文,等. 田黄颜色及萝卜纹研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2013, 32(4): 549-556.
- [15] 王磊,潘永信,李金华,等. 黄铁矿热转化矿物相变过程的岩石磁学研究[J]. 中国科学, 2008(9): 1 068-1 077.