

越南安沛红宝石的宝石学及谱学特征

王庆楠, 狄敬如

(中国地质大学珠宝学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 东南亚一个具有重要经济价值的红宝石矿床位于越南北部安沛(Yen Bai)的 Luc Yen 附近。选用越南安沛大理岩型红宝石为研究对象, 根据颜色特征分为 4 大类: 浅紫红色、紫红色、深红色及橙红色。采用常规宝石学测试及 X 射线荧光能谱仪、傅里叶变换红外光谱仪、激光拉曼光谱仪、紫外-可见分光光度计等测试技术, 对越南安沛红宝石进行宝石学特征和谱学特征的综合分析。结果表明, 越南安沛红宝石晶体呈典型的板柱状, 显微镜下常见丰富的气液包裹体, 部分样品可见越南红宝石特征的蓝色色区。红外光谱显示红宝石的 5 个本征峰, 部分样品可见由 O—H 基团伸缩振动引起的硬水铝石吸收峰。拉曼光谱主要由 $[AlO_6]$ 基团的弯曲振动和伸缩振动引起。结合成分分析和紫外-可见吸收光谱, 通过量化红宝石颜色的主波长、补色主波长及纯度值, 可将越南安沛红宝石的 4 类主要颜色区分开。

关键词: 红宝石; 宝石学特征; 谱学特征; 越南安沛

中图分类号: TS93; J528.1

文献标识码: A

文章编号: 1008-214X(2017)04-0001-10

DOI: 10.15964/j.cnki.027jgg.2017.04.001

Gemmological and Spectral Characteristic of Ruby from Yen Bai, Vietnam

WANG Qingnan, DI Jingru

(Gemmological Institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: One of the ruby deposits of important economic value in Southeast Asia is located near the city of Luc Yen, Yen Bai, North Vietnam. Ruby samples were collected in local deposits associated to marble from Yen Bai, Vietnam. According to the colour characteristics, the samples were divided into four categories: Light purplish red, purplish red, dark red, and orange. In this paper, the authors studied the gemmological and spectral characteristics of ruby samples from Yen Bai by conventional gemmological tests, EDXRF, Fourier transform infrared spectroscopy, Raman spectroscopy, and ultraviolet-visible spectrometry. The results indicated that the rubies belong to marble, which show a typical crystal form of hexagonal tabular. Besides, the variety of fluid inclusions could be observed by microscope, and some samples show the typical single blue zone of ruby from Vietnam. It shows the five in-

收稿日期: 2017-05-11

基金项目: 中国地质大学(武汉)珠宝检测技术创新中心开放基金 CJHIXM-S201635 (CIGTXM-S201617), 文章编号 CIGTWZ-2017017

作者简介: 王庆楠(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事宝石学方向研究。

通讯作者: 狄敬如(1964—), 女, 副教授, 主要从事宝石鉴定及宝石学研究工作。E-mail: 1016106644@qq.com

trinsic infrared absorption bands of ruby, and some are ascribed to O—H stretching vibration. Raman bands are mainly associated with the bending vibrations and stretching vibrations of $[\text{AlO}_6]$. Based on UV-Vis spectroscopy in combination with the component analysis, the four main colours can be separated by quantifying dominant wavelength, complementary dominant wavelength, and colour purity of the rubies from Yen Bai, Vietnam.

Key words: ruby; gemmological characteristic; spectral characteristic; Yen Bai, Vietnam

越南北部,尤其是安沛(Yen Bai),作为宝石开采和交易的中心,赋存了东南亚一个具有重要经济价值的红、蓝宝石矿床,矿区位于红河剪切带东南端、大象山变质带(Day Nui Con Voi metamorphic belt,简称 DNCV 杂岩)周围,是东南亚地区主要的地质不整合线^[1],该矿区产出的红宝石属大理岩型。由于越南的大部分矿区限制人员进入并实行保密政策,绝大多数的宝石都不是被专业人员发现的,人们对其了解不多。随着资料的积累,上世纪八十年代开采以来,国内外宝石学者开始对该地区地质背景进行探讨^[1-6],但是对于越南安沛红宝石的宝石学及谱学性质研究并未深入。

本文对越南安沛产出的大理岩型红宝石进行宝石学及谱学特征研究,并结合成分分析和紫外-可见吸收光谱对其颜色及色度学参数进行分类探

讨,旨在获得越南安沛红宝石全面的宝石学及谱学特征。

1 地质背景

越南红宝石主要出产于安沛陆安和义安贵州(图 1),安沛矿区位于河内(Hanoi)西北方向 270 km,距中越边界仅 75 km,地貌上主要为红河河谷。越南安沛主要的宝石矿床位于大象山变质带(Day Nui Con Voi metamorphic belt,简称 DNCV 杂岩)周围,大象山富铝岩石的变质程度达到高角闪岩相至麻粒岩相^[4]。在没有石英参与反应的情况下,白云母分解为刚玉和钾长石的温度为 600~720 °C,变质压力为 0.5~1.0 GPa^[7],属于该变质带的早期变质作用阶段。

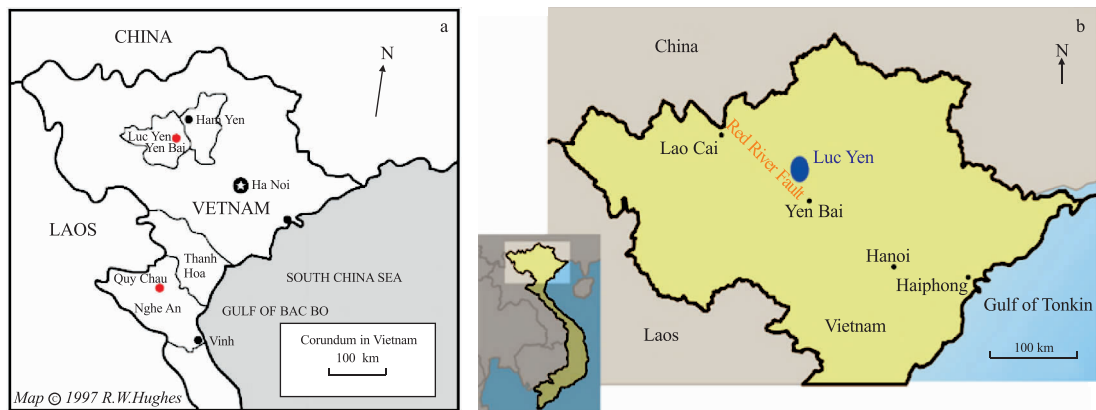


图 1 越南安沛红宝石矿区示意图

Fig. 1 Ruby deposits in Yen Bai, Vietnam

a. 越南主要红宝石矿区示意图^[5]; b. 越南安沛省陆安矿区地理位置^[6]

2 样品与测试方法

测试样品为从越南安沛当地某商人处购得的红宝石原石,根据该产地典型的红宝石颜色分为 4 类:浅紫红色、紫红色、深红色、橙红色。通过肉

眼和放大观察,从 300 颗红宝石原石中每类颜色挑选了 10~20 颗、质量为 0.65~3.91 g 的具有代表性的样品。部分样品根据实验要求进行双面抛光。

红外光谱测试在中国地质大学(武汉)珠宝学院完成,使用 BRUKER 公司生产的 VERTEX 80

型傅里叶变换红外光谱仪。测试条件:反射法和透射法,扫描范围 1 200~400 cm⁻¹和 4 000~1 500 cm⁻¹,分辨率 4 cm⁻¹,扫描次数 32 次。

拉曼光谱测试在中国地质大学(武汉)珠宝学院完成,使用 BRUKER 公司生产的 SENTERRA 型激光拉曼光谱仪。测试条件:激光光源波长 532 nm,激光输出功率 0.2 mW 和 20 mW,扫描范围 45~4 000 cm⁻¹和 45~800 cm⁻¹,分辨率 3~5 cm⁻¹,扫描 10 次,每次扫描时间 20 s。

成分测试在中国地质大学(武汉)珠宝学院完成,使用 QUANT'X 射线荧光能谱仪(EDXRF)。电压 8~20 kV,电流为 1.98 mA,主要测试区域为 Low Zb(8 kV,1.98 mA)和 Low Zc(12 kV,1.98 mA),使用自动寻峰和手动标峰对测试结果进行处理。

紫外-可见吸收光谱测试在中国地质大学(武汉)珠宝学院完成,使用 PerkinElmer 公司生产的 Lambda 650s 型紫外-可见分光光度计。测试条件:透射法,测试范围 380~780 nm,数据间隔 1 nm,扫描速度 800 nm/min。

3 测试结果

3.1 常规宝石学特征

越南安沛红宝石原石样品(图 2)外观呈晶形完好的六方柱或六方双锥,部分为破碎块状,部分边缘及内部可见黄褐色杂质;裂隙和裂理发育,抛光面具亮玻璃光泽。

样品多带紫色调,颜色可主要分为 4 组:样品 V-1-1~V-1-5(V-1 组)为浅紫红色、样品 V-2-1~V-2-5(V-2 组)为紫红色、样品 V-3-1~V-3-5(V-3 组)为深红色及样品 V-4-1~V-4-5(V-4 组)为橙红色。测试结果显示(表 1),4 组样品的折射率 $N_c=1.758\sim1.762$, $N_o=1.766\sim1.770$,双折射率为 0.008。长波紫外灯下 V-1、V-4 组样品为弱至中等红色荧光,V-2、V-3 组样品为中等至强红色荧光,短波紫外灯下均无荧光。采用静水称重法在纯净水中测定红宝石相对密度发现,相对密度变化较大,其原因可能受宝石中包裹体、裂纹、裂隙等影响。

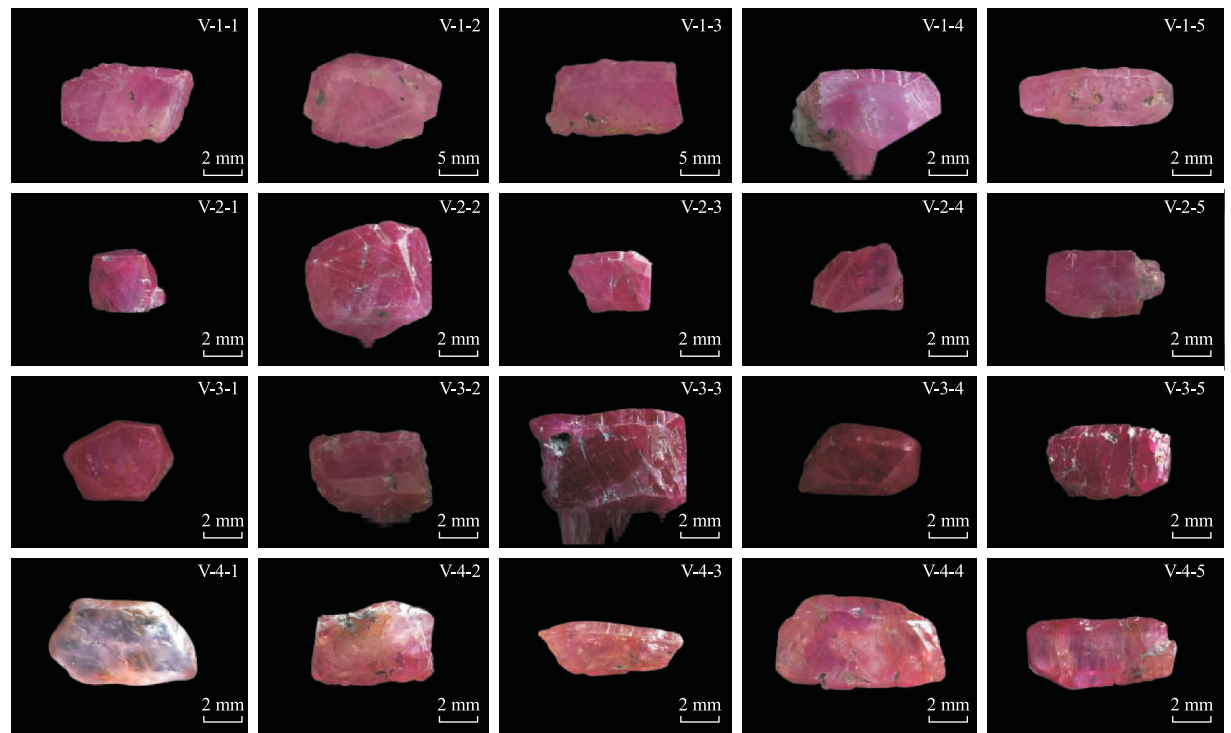


图 2 越南安沛红宝石样品

Fig. 2 Ruby samples from Yen Bai, Vietnam

表 1 越南安沛红宝石的宝石学特征

Table 1 Gemmological characteristics of rubies from Yen Bai, Vietnam

样品编号	颜色	折射率	荧光	相对密度	相对密度平均值
V-1-1	浅紫红色	1.761~1.769	LW 下中等红色,SW 下惰性	3.957	V-1 组:3.861
V-1-2	浅紫红色	1.760~1.768	LW 下弱红色,SW 下惰性	3.720	
V-1-3	浅紫红色	1.761~1.769	LW 下弱红色,SW 下惰性	3.909	
V-1-4	浅紫红色	1.758~1.766	LW 下弱红色,SW 下惰性	3.855	
V-1-5	浅紫红色	1.761~1.769	LW 下弱红色,SW 下惰性	3.864	
V-2-1	紫红色	1.761~1.769	LW 下中等红色,SW 下惰性	3.869	V-2 组:3.913
V-2-2	紫红色	1.758~1.766	LW 下中等红色,SW 下惰性	3.976	
V-2-3	紫红色	1.759~1.767	LW 下中等红色,SW 下惰性	3.947	
V-2-4	紫红色	1.762~1.770	LW 下强红色,SW 下惰性	3.855	
V-2-5	紫红色	1.761~1.769	LW 下中等红色,SW 下惰性	3.918	
V-3-1	深红色	1.762~1.770	LW 下强红色,SW 下惰性	3.908	V-3 组:3.923
V-3-2	深红色	1.762~1.770	LW 下强红色,SW 下惰性	3.923	
V-3-3	深红色	1.758~1.766	LW 下强红色,SW 下惰性	3.959	
V-3-4	深红色	1.761~1.769	LW 下强红色,SW 下惰性	3.915	
V-3-5	深红色	1.762~1.770	LW 下强红色,SW 下惰性	3.910	
V-4-1	橙红色	1.761~1.769	LW 下弱红色,SW 下惰性	3.921	V-4 组:3.947
V-4-2	橙红色	1.762~1.770	LW 下弱红色,SW 下惰性	3.976	
V-4-3	橙红色	1.761~1.769	LW 下弱红色,SW 下惰性	3.928	
V-4-4	橙红色	1.761~1.769	LW 下中等红色,SW 下惰性	3.967	
V-4-5	橙红色	1.762~1.770	LW 下弱红色,SW 下惰性	3.943	

3.2 内含物特征

宝石显微镜下,越南安沛红宝石中常见丰富的气液包裹体,是在红宝石主晶生长的同时增生形成的。该类包裹体有的可能为三相包裹体(图 3a,图 3b),呈薄片状或负晶;而一般多为单相或两相包裹体(图 3c),常定向排列。由于越南安沛红宝石中的愈合裂隙较为发育,裂隙内常被呈指纹状排列的气液相包裹体充填(图 3d)。

在样品 V-3-4 中发现越南红宝石特征的蓝色色区,该色区沿着双晶生长面呈层状分布,为边界不清的混浊片状,颇似一团蓝色的烟雾。在正交偏光下旋转 360°观察宝石的蓝色色区,发现蓝色色区与红宝石主晶会同时随着转动角度发生四明四暗的变化(图 3e,图 3f),可知该蓝色色区是与红宝石主晶结晶习性相同的生长色带,排除了其为固体包裹体的可能。

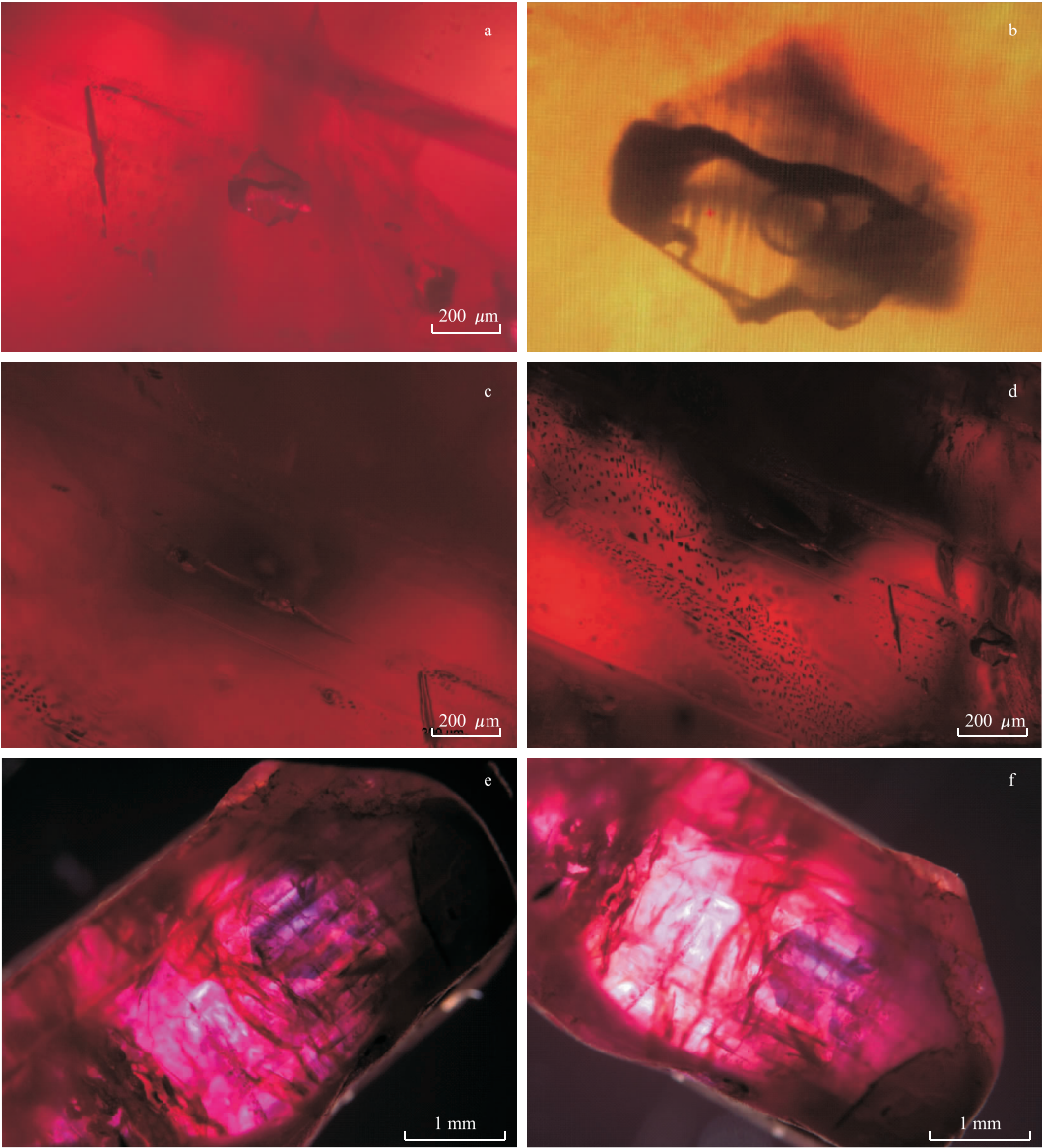


图 3 越南安沛红宝石样品中的特征包裹体

Fig. 3 Characteristic inclusions in rubies from Yen Bai, Vietnam

a. 薄片状气液固三相包裹体;b. a 图中气液固三相包裹体放大图;c. 定向排列的两相包裹体;d. 指纹状或羽状气液包裹体;
e. 正交偏光下样品 V-3-4 中特征的蓝色色区(消光位置,视域最暗);f. 正交偏光下样品 V-3-4 中特征的蓝色色区(垂直消光位置,视域最亮)

3.3 振动光谱分析

刚玉族宝石晶体结构中,Al 的位置对称为 C_3 ,O 的位置对称为 C_2 。由因子群与位置群的相关分析,其晶体中光性模式不可约表示为: $T_g = 2A_{1g} + 3A_{2g} + 5E_g + 2A_{1u} + 2A_{2u} + 4E_u$,其中 $3A_{2g} + 2A_{1u}$ 为非活性振动, $2A_{2u} + 4E_u$ 为红外活性, $2A_{1g} + 5E_g$ 为拉曼活性,即理论上红宝石应存在 6 个红外活性振动和 7 个拉曼活性振动模式^[8]。

3.3.1 红外吸收光谱

选取 2 颗透明度较好的样品(V-2-3 和 V-4-1)进行透射法测试,4 颗透明度较差的样品(每组各一颗:V-1-2、V-2-5、V-3-3、V-4-3)进行反射法测试。

从理论上分析,刚玉族宝石应在 $380 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 之间有 1 个振动模式,在 $400 \sim 800 \text{ cm}^{-1}$ 之间有 5 个振动模式,分别属于 $2A_{2u}$ 及

$4E_u$ 不可约表示^[9-10]。测试结果显示,样品在指纹区均显示 5 个特征吸收峰(图 4),分别为: 517 cm^{-1} 处的强吸收峰, 630 、 485 cm^{-1} 处的中等强度吸收峰以及 460 、 428 cm^{-1} 处的弱吸收峰,这都属于红宝石的本征峰。除此之外,部分样品可见明显的 $2\ 931$ 、 $2\ 110$ 、 $1\ 980\text{ cm}^{-1}$ 处由 O—H 基团伸缩振动引起的硬水铝石吸收峰^[11](图 5),对于天然红宝石的鉴定具有重要意义。位于 $3\ 692$ 、 $3\ 623\text{ cm}^{-1}$ 处的中等强度的吸收峰是由—OH 的伸缩振动引起,推测与红宝石内部大量的气液包裹体有关^[11]。

此外,由于 Fe^{3+} 、 Cr^{3+} 以类质同象形式替代 Al^{3+} ,引起红宝石晶体结构发生畸变,对称性降

低,二重简并解除,从而在 $460\sim 428\text{ cm}^{-1}$ 范围内还可见一些分裂峰^[9,12]。

3.3.2 拉曼光谱分析

V-1、V-4 组样品由于 Cr 含量低,受荧光基体影响较小,可显示较明显的拉曼位移;V-2、V-3 组样品由于含有较高质量分数的 Cr,其拉曼谱峰被荧光峰所掩盖不易观察分析。对 V-1 组样品进行拉曼光谱测试,结果显示(图 6),样品的拉曼峰位基本一致:拉曼位移 379 、 418 cm^{-1} 处与 $[\text{AlO}_6]$ 基团的弯曲振动有关, 587 、 659 和 697 cm^{-1} 处与 $[\text{AlO}_6]$ 基团的伸缩振动有关^[13-14]。其中 418 cm^{-1} 处为对称弯曲振动($\text{O}-\text{Al}-\text{O}_{\text{bend}}$)引起^[14],并显示较强的光谱特征。

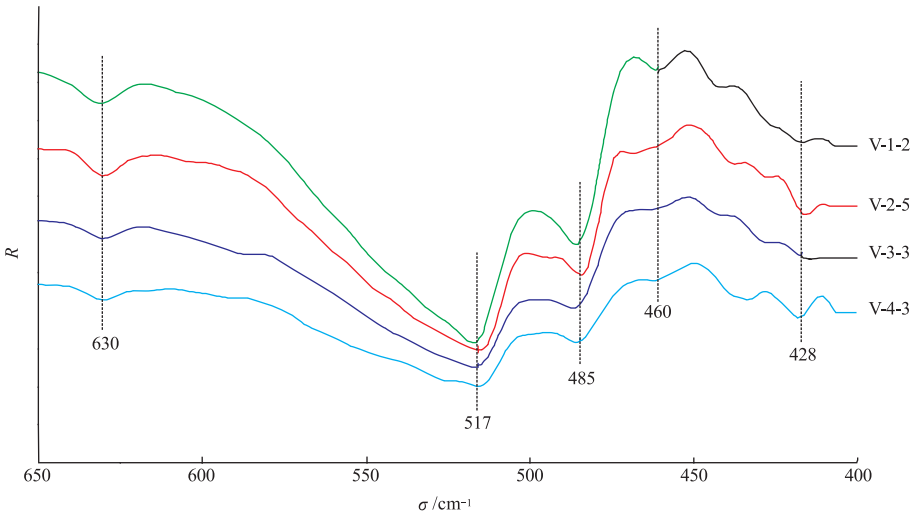


图 4 越南安沛红宝石的指纹区红外光谱
Fig. 4 Infrared spectra in fingerprint region of rubies from Yen Bai, Vietnam

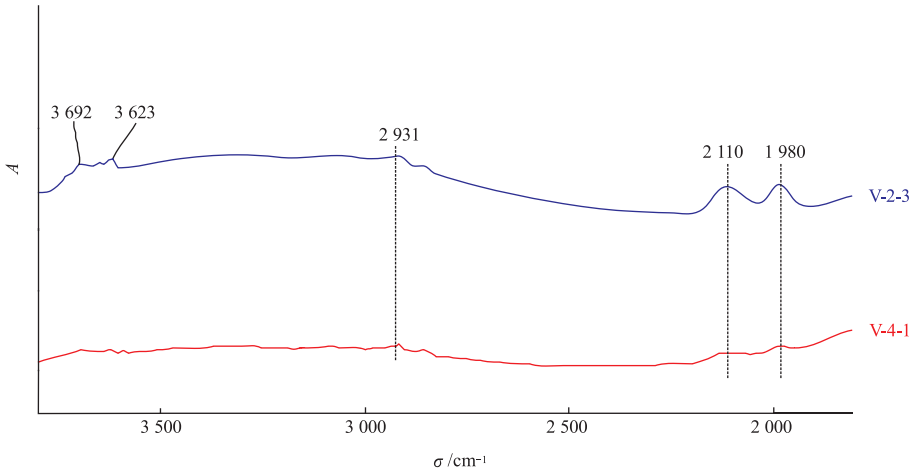


图 5 越南安沛红宝石的官能团区红外光谱
Fig. 5 Infrared spectra in functional group region of rubies from Yen Bai, Vietnam

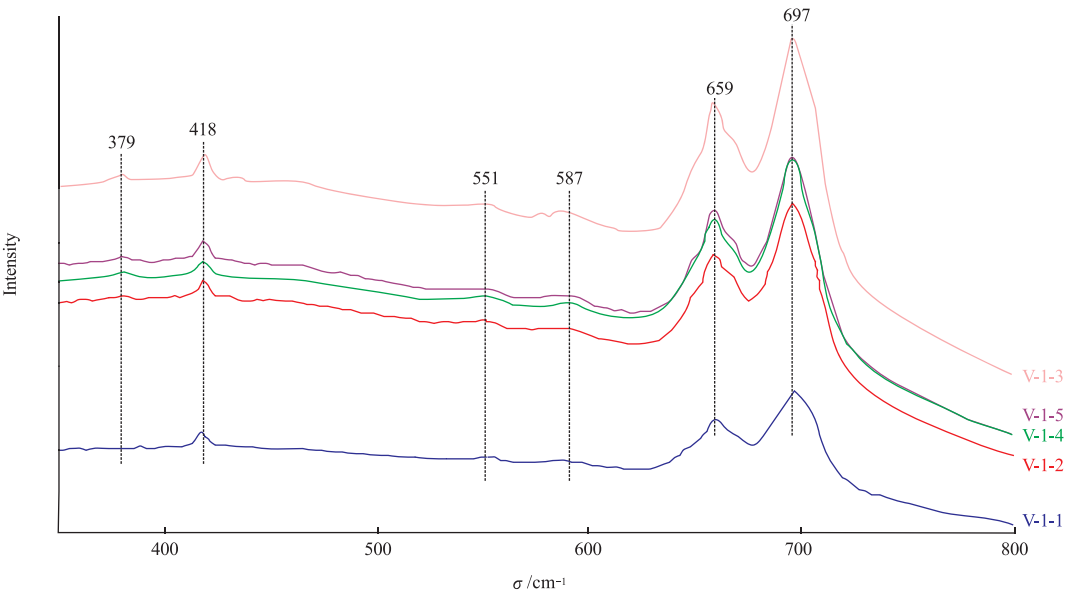


图 6 越南安沛红宝石的拉曼光谱

Fig. 6 Raman spectra of rubies from Yen Bai, Vietnam

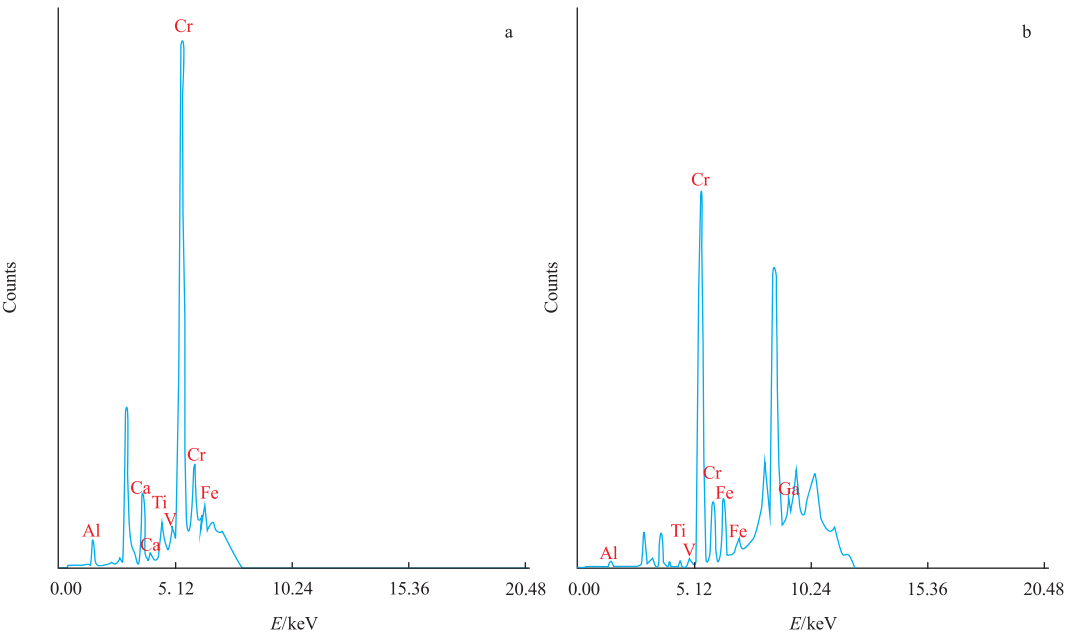


图 7 样品 V-1-2 的 X 射线荧光能谱

Fig. 7 EDXRF spectra of V-1-2 sample

a. 样品 V-1-2 的 Low Zb 区域测试结果; b. 样品 V-1-2 的 Low Zc 区域测试结果

3. 4 化学成分特征

X 射线荧光能谱定性及半定量分析结果表明 (图 7),越南安沛红宝石样品的杂质元素主要有

Cr、Fe、Ti、V 和 Ga 等。Cr 的质量分数较高,Fe 的质量分数较低。从目前的研究来看^[15],Ga 元素在天然红、蓝宝石的鉴定中具有指导意义。

3.5 紫外-可见吸收光谱

选用 4 颗晶形较好的红宝石(V-2-1、V-2-2、V-3-1 和 V-3-3)进行定向切片,厚度为 3 mm,分别从 o 光和 e 光两个方向进行测试,发现其吸收光谱图形大致相似,只是吸收强度有所不同。

沿 c 轴方向测试结果显示(图 8),越南安沛红宝石在 410、559、659、668、693 nm 处有吸收峰。其中,以 410、559 nm 为中心的两个强吸收峰归属于

Cr^{3+} 自旋允许跃迁导致的 ${}^4\text{A}_2\rightarrow{}^4\text{T}_1$ 和 ${}^4\text{A}_2\rightarrow{}^4\text{T}_2$ 的 $d-d$ 电子跃迁。659、668 nm 处的两个弱吸收峰由 ${}^4\text{A}_2\rightarrow{}^2\text{T}_1$ 跃迁引起,归属于 Cr^{3+} 的自旋禁戒跃迁,故而吸收较弱^[16]。在 693 nm 处出现一处由 Cr^{3+} 的 ${}^2\text{E}\rightarrow{}^4\text{A}_2$ 所导致的荧光发射峰,指示了红宝石的荧光现象^[17]。此外,部分样品中显示的 Fe^{3+} 对可见光 468、476 nm 的吸收是由于电子的 ${}^6\text{A}_1\rightarrow{}^4\text{A}_1$ 和 ${}^4\text{E}_g$ 能级跃迁所致^[18]。

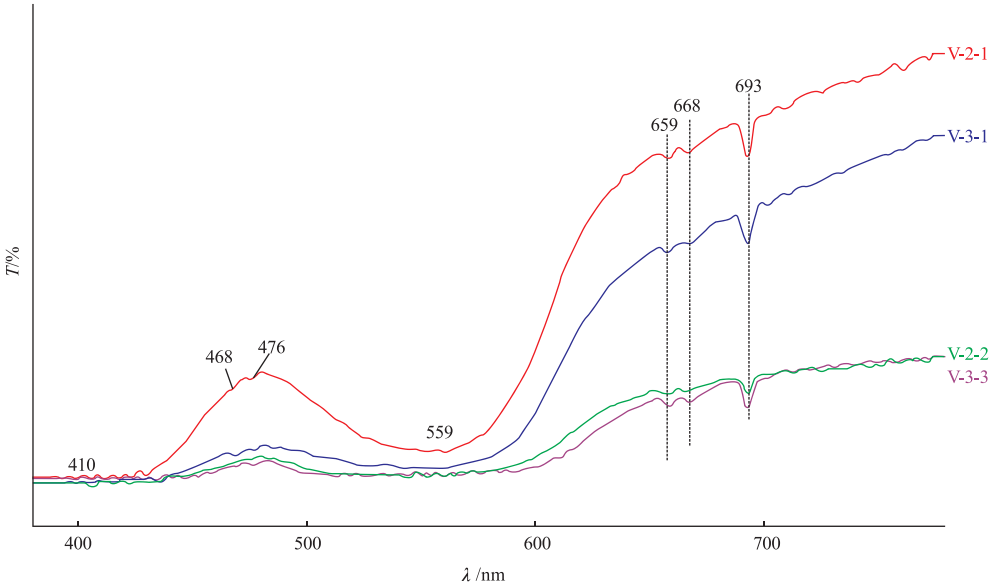


图 8 越南安沛红宝石的紫外-可见吸收光谱
Fig. 8 UV-Vis absorption spectra of rubies from Yen Bai, Vietnam

4 越南安沛红宝石的色度学参数

利用 Lambda 650s 型紫外-可见分光光度计收集的数据,通过 Color 软件量化 20 颗红宝石样品的三刺激值、色度参数和纯度,并在 CIE1931 色品图上进行投点,运用作图法得出各点的主波长或补色主波长(图 9),统计如表 2。

由表 2 可知,带紫色调的 V-1 组浅紫红色样品和 V-2 组紫红色样品均投点在不具有主波长的三角形区域内,故用补色主波长表示,统计发现两组样品的补色主波长均在 493~498 nm(蓝绿色)之间。在特定的标准照明体下,颜色的补色主波长是被致色元素吸收的主要波长的综合体现。根据颜色互补原理,可知这两组样品的反射光色调为不同比例的红色和蓝色混合形成的紫红色。两组样品的纯度显示为负值,其绝对值(纯度值)决定了样品的饱和度。通过纯度值可以区分越南

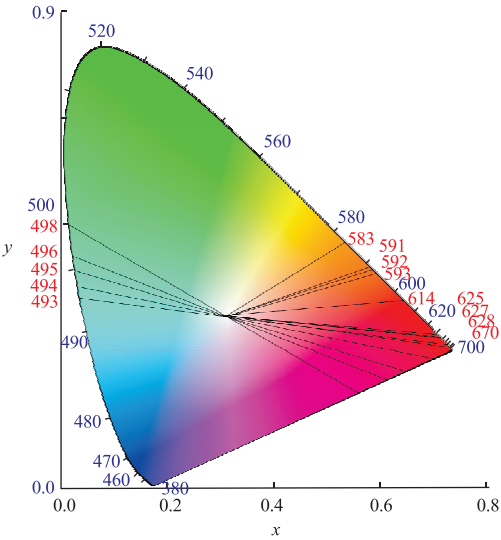


图 9 越南安沛红宝石 CIE1931 色品
Fig. 9 CIE1931 chromaticity diagram of rubies from Yen Bai, Vietnam

安沛带紫色调的红宝石,V-1 组浅紫红色样品的纯度值小于 30%;V-2 组紫红色样品的纯度值大于 30%。

V-3 组深红色样品和 V-4 组橙红色样品均可

直接计算出主波长,而主波长决定了其色调的差异。V-3 组的主波长均投点在 620~670 nm 的红色色调区域内,V-4 组则投点在 580~620 nm 的橙红色色调范围内,其纯度均为正值。

表 2 越南安沛红宝石的色度参数
Table 2 Chromaticity parameters of rubies from Yen Bai, Vietnam

样品编号	三刺激值			CIE 1976 L* a* b*			主波长或 补色主波长 /nm	纯度
	X	Y	Z	L*	a*	b*		
V-1-1	5.08	4.12	3.91	24.05	15.76	3.06	494	−26.41%
V-1-2	9.41	8.30	8.22	34.60	13.17	2.72	494	−17.73%
V-1-3	5.65	4.62	4.29	25.64	15.71	3.73	493	−26.76%
V-1-4	46.15	42.69	46.33	71.34	16.51	0.16	498	−9.71%
V-1-5	13.33	12.23	12.44	41.57	11.63	2.21	494	−13.44%
V-2-1	2.26	1.55	1.42	12.92	19.04	2.82	495	−41.42%
V-2-2	2.07	1.46	1.46	12.37	17.37	1.39	496	−34.97%
V-2-3	4.12	3.04	2.83	20.20	19.62	3.18	495	−34.80%
V-2-4	4.63	3.36	2.96	21.44	21.24	4.42	494	−38.74%
V-2-5	3.66	2.64	2.56	18.54	20.01	2.23	495	−34.65%
V-3-1	3.27	2.34	1.62	17.18	19.66	8.04	627	37.59%
V-3-2	7.49	5.74	4.73	28.76	21.40	6.87	628	26.53%
V-3-3	1.33	0.97	0.69	8.78	13.58	5.21	625	35.36%
V-3-4	4.00	2.54	1.56	18.11	26.93	10.19	628	46.19%
V-3-5	3.80	2.73	2.23	18.93	20.46	5.47	670	28.87%
V-4-1	37.87	38.09	31.89	68.09	5.46	12.16	583	17.52%
V-4-2	4.12	3.48	1.69	21.86	12.43	15.38	591	49.26%
V-4-3	8.43	7.17	4.69	32.20	15.22	13.00	595	35.58%
V-4-4	4.14	2.95	1.88	19.84	21.48	10.07	614	41.47%
V-4-5	4.80	5.73	3.23	28.93	13.46	14.47	592	28.87%

5 结论

越南安沛红宝石晶体呈典型的板柱状,常见丰富的气液包裹体,部分样品可见越南红宝石特征的沿双晶生长面呈层状分布的蓝色色区。

红外光谱测试结果显示,样品在指纹区均显示 5 个红宝石的本征峰,分别为:517 cm^{-1} 处的强吸收峰,630、485 cm^{-1} 处的中等强度吸收峰以及 460、428 cm^{-1} 处的弱吸收峰。部分样品可见明显的 2 931、2 110、1 980 cm^{-1} 处由 O—H 基团伸缩振动引起的硬水铝石吸收峰。

拉曼光谱显示,拉曼位移 379、418 cm^{-1} 处与 $[\text{AlO}_6]$ 基团的弯曲振动有关,587、659 和 697 cm^{-1} 处与 $[\text{AlO}_6]$ 基团的伸缩振动有关。其中 418 cm^{-1} 处为对称弯曲振动(O—Al—O_{bend})引起,显示较强的光谱特征。

结合成分测试和紫外-可见吸收光谱测试,结果显示,杂质元素主要有 Cr、Fe、Ti、V 和 Ga 等。以 410、559 nm 为中心的两个强吸收峰以及 659、668 nm 的弱吸收峰归属于 Cr^{3+} 的 $d-d$ 电子跃迁,693 nm 处的荧光发射峰由 Cr^{3+} 的 ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$ 导致。部分样品还可见 Fe^{3+} 的电子跃迁导致的 468、476 nm 处的弱吸收峰。

量化越南安沛省红宝石颜色的色度参数可知:不具有主波长时,补色主波长为 493~498 nm,且纯度值小于 30%,样品为浅紫红色;补色主波长为 493~498 nm,且纯度值大于 30%,样品为紫红色。具有主波长时,主波长为 620~670 nm,样品为深红色;主波长为 580~620 nm,样品为橙红色。

参考文献:

[1] Hofmeister W. 中国云南省红河剪切带宝石找矿潜力评价——与越南北部安沛地区宝石矿床之对比[J]. 潘长云,

译. 云南地质,2003,22(3):342—343.

- [2] 陈志强. 越南红宝石简介[J]. 广西地质,1992,5(3):87—89.
- [3] Long P V, Vinh H Q, Nghia N X. 越南基巧红宝石中的包裹体及其成因[J]. 闫晨,译. 宝石和宝石学杂志,2004,6(3):40—42.
- [4] 吴峻岐,刘俊来, Dung T M, 等. 越南西北部大象山超高温变质岩的发现及其区域构造意义[J]. 岩石学报,2011,27(9):2 809—2 820.
- [5] Hughes R W. Ruby & sapphire[M]. Colorado: RWH Pub,1997.
- [6] Long P V, Pardieu V, Giuliani G. Update on gemstone mining in Luc Yen, Vietnam[J]. Gems & Gemology, 2013,49(4):233—245.
- [7] 沈其韩,耿元生,王新社,等. 一种刚玉夕线钾长片麻岩的岩石学矿物学特征及形成环境[J]. 地质通报,2004,23(2):99—106.
- [8] 张保民,袁晏明. 矿物红外光谱讲义[M]. 武汉:武汉地质学院,1984.
- [9] 刘学良. 云南红宝石的宝石学特征及改善工艺研究[D]. 广州:华东理工大学,2011.
- [10] 业冬,刘学良. 云南元江江红宝石的宝石学特征研究[J]. 宝石和宝石学杂志,2006,8(3):21—24.
- [11] 彭文世,刘高魁. 矿物红外光谱图集[M]. 北京:科学出版社,1982.
- [12] 邹进福. 山东昌乐蓝宝石的谱学特征及呈色机理[J]. 桂林工学院学报,1995,15(3):252—256.
- [13] 范建良,郭守国,刘学良,等. 拉曼光谱在红宝石检测中的应用研究[J]. 应用激光,2008,28(2):150—154.
- [14] Misra A, Bist H D, Navati M S, et al. Thin film of aluminum oxide through pulsed laser deposition: A micro-Raman study[J]. Materials Science & Engineering B, 2001, 79(1):49—54.
- [15] 兰延,张钧,陈春. X 荧光光谱技术在红宝石、合成红宝石、处理红宝石鉴定中的应用[J]. 中国宝石,2008(1):190—191.
- [16] 伯恩斯 R G. 晶体场理论的矿物学应用[M]. 任觉,郭其梯,译. 北京:科学出版社,1977.
- [17] 吕晓瑜,许如彭,汤红云,等. GRS“鸽血红”红宝石颜色分析案例及其启示[J]. 宝石和宝石学杂志,2012,14(4):44—49.
- [18] Nassau K. The physics and chemistry of color: The fifteen causes of color[M]. New York: Wiley, 1983:77—105.