

石榴石的品种及鉴定

罗跃平¹, 郑秋菊², 王春生¹

(1. 国家首饰质量监督检验中心, 北京 100101; 2. 深圳国艺珠宝评估有限公司, 广东 深圳 518020)

摘要: 本文通过对比不同品种石榴石的常规宝石学特征和红外光谱特征, 以期找到一种可以快速区别不同品种石榴石的方法。结果表明, 铝系列和钙系列石榴石之间的区别较为简单: 铝系列一般为暖色系的红色、橙色等, 而钙系列一般为冷色系的绿色; 铝系列石榴石 B 带频率一般高于 870 cm^{-1} , 且常缺少 D 带, 而钙系列石榴石 B 带频率一般低于 870 cm^{-1} , 而且一般具有 D 带。钙系列中钙铝榴石、钙铁榴石由于完全类质同相混溶较少, 通过折射率和红外光谱也可以较好区别: 钙铝榴石折射率一般小于 1.78, 钙铁榴石折射率一般大于 1.78; 钙铝榴石的红外光谱 B 带一般在 864 cm^{-1} 左右, 而钙铁榴石的 B 带一般在 837 cm^{-1} 左右。铝系列中镁铝榴石、铁铝榴石、锰铝石榴石由于相互混溶现象普遍, 需要综合颜色、折射率和红外光谱特征才能进行准确的判定。

关键词: 石榴石; 品种鉴定; 折射率; 红外光谱; 铝系列; 钙系列

中图分类号: TS93

文献标识码: A

文章编号: 1008-214X(2015)03-0036-07

Variety and Identification of Garnet

LUO Yueping¹, ZHEN Qiuju², WANG Chunsheng¹

(1. National Quality Supervision and Inspection Center, Beijing 100101, China;

2. National Gems & Artworks Appraisal Company limited of Shenzhen, Shenzhen 518020, China)

Abstract: In this paper, the common characteristics and infrared spectra of different varieties of garnets are compared in order to find a fast way to distinguish garnet. The results show it is relatively straightforward to separate pyralspite series from ugrandite series. The colour of pyralspite series usually shows warm-toned, such as red and orange, on the other hand ugrandite series often shows cool-toned such as green colour. The B-zone frequency of pyralspite infrared spectrum is higher than 870 cm^{-1} and there is usually no D-zone frequency. The B-zone frequency of ugrandite is lower than 870 cm^{-1} and it shows D-zone frequency in the infrared spectrum. Because grossular and andradite are incomplete isomorphism series, it is also relatively straightforward to separate grossular from andradite. The refractive index of grossular is lower than 1.78 and the B-zone infrared frequency of grossular is at 864 cm^{-1} . While the refractive index of andradite is higher than 1.78 and the B-zone infrared frequency of andradite is at 837 cm^{-1} . Because the pyrope, almandine and spessartine are isomorphism series, it is difficult to separate them. The colour, refractive index and infrared spectrum should be considered overall to make an accurate conclusion.

Key words: garnet; variety identification; refractive index; infrared spectrum; pyralspite series; ugrandite series

收稿日期: 2014-11-24

作者简介: 罗跃平(1978—), 男, 高级工程师, CGC, CPVG, 主要从事珠宝首饰检测和评估工作。

石榴石品种众多,颜色丰富,有些品种如沙弗莱石、翠榴石,由于商业推广效果得好,了解的人比较多,但其它的品种知之者甚少,人们甚至常误认为其它红色石榴石都是价值较低品种。近年来,由于彩宝市场的不断升温,石榴石以其纯天然的品质和丰富艳丽的颜色受到越来越多人的喜欢,但是由于石榴石各品种价格相差较大,区别石榴石品种就显得非常重要,又由于石榴石品种比较复杂,区别起来难度较大。前人应用不同的方法对石榴石品种的鉴定做了一定的研究,如陈丁滢^[1]应用X射线荧光光谱法对石榴石品种进行鉴定,范健良等^[2]应用拉曼光谱仪对石榴石品种进行鉴定。但这些方法中有的可能分析较为困难,有的所需仪器一般实验室并不配备,因此应用起来有一定的局限性。

笔者通过收集具有代表性的石榴石品种,根据前人的研究成果总结了不同石榴石品种的一般特征,并应用常规检测结合红外光谱手段,找到了一种可以快速区别不同品种的石榴石的方法。

1 样品和测试方法

笔者收集了不同品种石榴石共15粒(图1),编号P1、P2、P3为镁铝榴石,编号A4、A5、A6为铁铝榴石,编号S7、S8、S9为锰铝榴石,编号G10、G11、G12为钙铝榴石,编号An13、An14、An15为钙铁榴石,并对这些石榴石进行了常规折射率测试和红外光谱测试。红外光谱测试应用德国BRUKER TENSOR27红外光谱仪,仪器分辨率 4 cm^{-1} ,扫描次数32次。



图1 不同品种石榴石

Fig. 1 Different varieties of garnets

2 不同品种石榴石的特征

石榴石是岛状硅酸盐矿物,由于这一族矿物存在着广泛的类质同象替代,因此每一种石榴石的化学成分亦有较大变化。石榴石的化学成分通式为 $A_3B_2(SiO_4)_3$ 。其中A表示二价阳离子,以 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Ca^{2+} 等离子为主;B代表三价阳离子,多为 Al^{3+} 、 Cr^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Ti^{3+} 、 V^{3+} 及 Zr^{3+}

等。自然界中,石榴石通常是以类质同象替代的过渡态存在,很少有端员组分的石榴石存在。宝石学家们把石榴石分为两大类,铝系列石榴石,主要有镁铝榴石、铁铝榴石、锰铝榴石;钙系列石榴石,主要有钙铝榴石、钙铁榴石、钙铬榴石^[3]。

2.1 镁铝榴石

2.1.1 常规宝石学特征

镁铝榴石以红色、紫红色和橙红色为主,镁铝榴石常含有一定量的铁铝榴石,Hoover^[4]测试了

几十件镁铝榴石的样品,发现大多数镁铝榴石含约12%~48%的铁铝榴石,有的含有一定量的锰铝榴石。镁铝榴石的折射率为1.73~1.76,随铁铝榴石、锰铝榴石含量的增加而变大。镁铝榴石样品P1、P2、P3的折射率实测值如表1。

表1 镁铝榴石P1、P2、P3的折射率

Table 1 Refractive index of pyrope samples

样品编号	折射率
P1	1.735
P2	1.768
P3	1.752

商业上镁铝榴石的名称有铬镁铝榴石、马来亚石榴石、彩粉镁铝榴石、红榴石等。铬镁铝榴石:深红色镁铝榴石,折射率一般较低。马来亚石榴石:橙色镁铝榴石,常含有一定量的锰铝榴石,折射率通常较高。粉彩色镁铝榴石:粉色、粉紫色、褐粉色镁铝榴石。红榴石:紫红色镁铝榴石,常含一定量的铁铝榴石。变色石榴石:具各种颜色,具变色效应^[4]。

2.1.2 红外光谱特征

样品P1和样品P3的红外光谱结果(图2)显示,其在996、915、878、589和536 cm^{-1} 等处具有 $[\text{SiO}_4]$ 有关的吸收峰以及与Al—O有关的吸收峰493、465 cm^{-1} ,其中630 cm^{-1} 吸收极为微弱。样品P2的红外光谱频率向低波数移动了2~3 cm^{-1} ,这与其含有一定量的锰铝榴石或铁铝榴石有关^[4]。

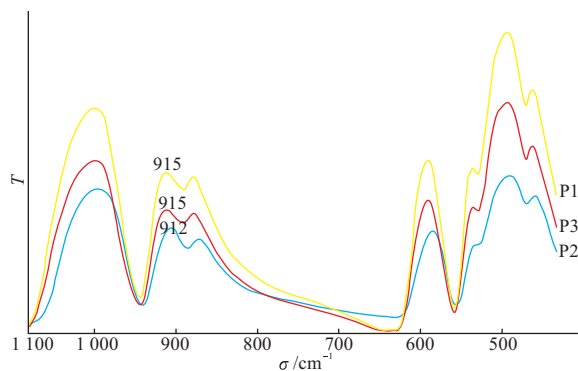


图2 镁铝榴石的红外光谱

Fig. 2 Infrared spectra of pyropes

2.2 铁铝榴石

2.2.1 常规宝石学特征

铁铝榴石是最常见的石榴石品种,一般为褐

红色、深红色、紫红色,含有较高含量的Fe,折射率一般大于1.78。据Hoover^[4]统计,铁铝榴石一般含有25%~50%的镁铝榴石,造成其折射率比纯的铁铝榴石低。商业上一般把紫红色铁铝榴石称为红榴石,但实际上红榴石更多的是指镁铝榴石。

2.2.2 红外光谱特征

样品A5和样品A6红外光谱结果(图3)显示,在994、902、869、638、580和532 cm^{-1} 处显示 $[\text{SiO}_4]$ 有关的吸收峰,在490、457 cm^{-1} 等处显示与Al—O有关的吸收峰,其中638 cm^{-1} 吸收较为微弱。样品A4的红外光谱比样品A5和样品A6向高波数移动2 cm^{-1} 左右,同时不出现638 cm^{-1} 谱带,这可能与含有一定量的镁铝榴石有关,镁铝榴石含量越高,638 cm^{-1} 谱带越弱^[5]。

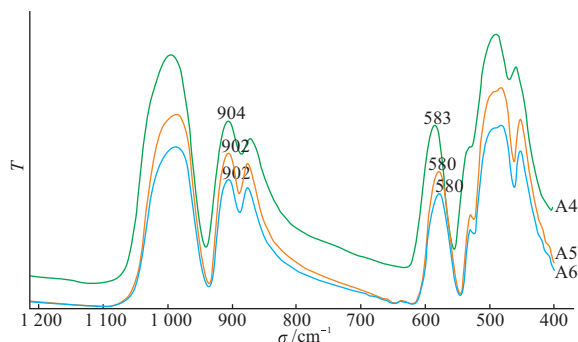


图3 铁铝榴石的红外光谱

Fig. 3 Infrared spectra of almandines

2.3 锰铝榴石

2.3.1 常规宝石学特征

锰铝榴石有橙色、褐橙色和橙红色,其橙色是由于含有致色元素Mn。锰铝榴石的折射率一般大于1.78。经X射线荧光光谱仪测试,偏红色锰铝榴石含有一定量的铁,证明其内部含一定量的铁铝榴石。据Hoover^[4]测试,随着铁铝榴石含量的增多,折射率增大。

商业上锰铝榴石的名称有橘色石榴石、芬达石榴石、变色石榴石等。橘色石榴石:橘红色锰铝榴石,一般颜色较深,偏红。芬达石榴石:亮橙色锰铝榴石。变色石榴石:呈各种颜色,具变色效应^[4]。

2.3.2 红外光谱特征

红外光谱结果(图4)显示,锰铝榴石样品S7、样品S8、样品S9均具有与 $[\text{SiO}_4]$ 有关的吸收峰964、891、860、628和570 cm^{-1} 吸收峰及与Al—O有关的487、447 cm^{-1} 吸收峰。

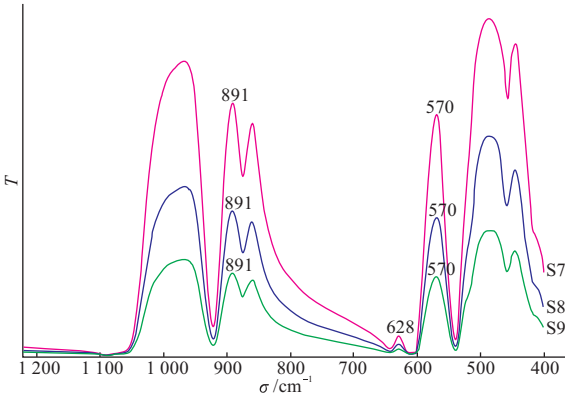


图 4 锰铝榴石的红外光谱
Fig. 4 Infrared spectra of spessartines

2.4 钙铝榴石

2.4.1 常规宝石学特征

钙铝榴石是石榴石中颜色最多的石榴石。其从近无色到黑色都有(除蓝色、紫色外)。市场上比较有影响的品种是沙弗莱石和贵榴石。其折射率范围比较大,从 1.71~1.78。钙铝榴石 G10、G11、G12 的折射率实测值如表 2。

商业上的钙铝榴石的名称有沙弗莱石、贵榴石、蔷薇石榴石、马里石榴石和水钙铝榴石。

沙弗莱石:深绿色钙铝榴石;贵榴石:橙色钙铝榴石;蔷薇石榴石:粉色钙铝榴石;马里石榴石:最早 1994 年在西非马里发现,其具有与翠榴石相似的高色散,主要为黄绿色、褐色,也有近无色和红色。水钙铝榴石:含水的钙铝榴石,一般为集合体出现,有粉色、白色和绿色。折射率一般较低,低至 1.71^[4]。

表 2 钙铝榴石 G10、G11、G12 的折射率

Table 2 Refractive index of grossular samples

样品编号	折射率
G10	1.740
G11	1.770
G12	1.730

2.4.2 红外光谱特征

红外光谱结果(图 5)显示,样品 G10 和样品 G12 钙铝榴石均在 952、864、835、614 及 557 cm^{-1} 等处具有与 $[\text{SiO}_4]$ 有关的吸收峰及与 $\text{Al}-\text{O}$ 有关的 488、447 cm^{-1} 吸收峰。样品 G11(马里石榴石)的红外光谱比 G10 和 G12 钙铝榴石向低波数移动了 4~9 cm^{-1} ,这与其含有一定量的钙铁榴石有关^[5]。

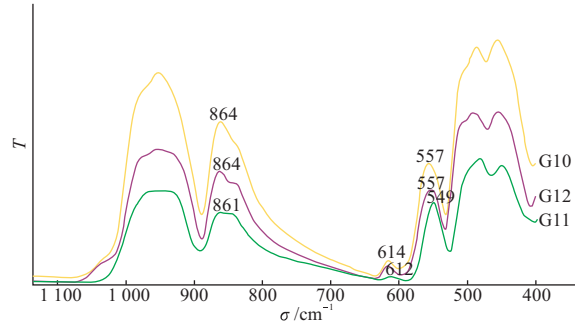


图 5 钙铝榴石的红外光谱
Fig. 5 Infrared spectra of grossular samples

2.5 钙铁榴石

2.5.1 常规宝石学特征

钙铁榴石一般为绿色、褐黄色,由于含 Fe 量较高,颜色较深,折射率也较高,一般为大于 1.78,达到 1.85~1.88。

钙铁榴石的商业名称有翠榴石、黄榴石、黑榴石、彩虹石榴石。翠榴石:绿色钙铁榴石称为翠榴石,翠榴石非常稀少,也是石榴石中为数不多需要处理的宝石(加热去除褐色调),人们常将褐绿色钙铁榴石处理成非常漂亮的绿色。黄榴石:褐色或黄色的钙铁榴石。黑榴石:含 Ti 较多的黑色钙铁榴石。彩虹石榴石:表面有干涉色的钙铁榴石^[4]。

2.5.2 红外光谱特征

样品 An13、An14、An15 均显示图 6 所示的红外光谱,在 930、837、812、584 和 518 cm^{-1} 等处显示与 $[\text{SiO}_4]$ 有关的吸收峰,在 478、441 cm^{-1} 处显示与 $\text{Fe}-\text{O}$ 有关的吸收峰。

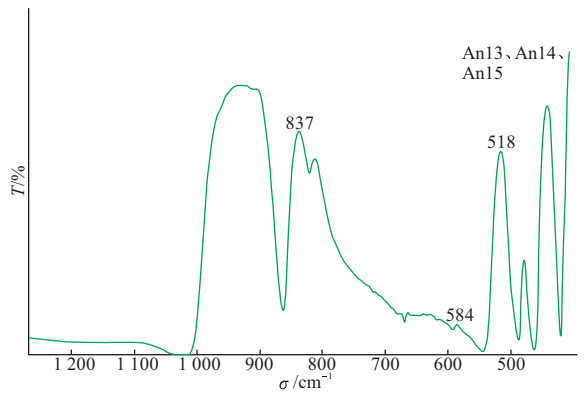


图 6 钙铁榴石的红外光谱
Fig. 6 Typical infrared spectrum of andardite sample

2.6 钙铬榴石

钙铬榴石的颜色为鲜艳绿色、蓝绿色,一般颗粒较小,较为稀少,仅在俄罗斯、阿富汗等地有产

出。其折射率一般为 1.84。由于市场上未能收集到样品,本文中不做讨论。

3 分析和讨论

3.1 不同品种石榴石折射率和红外光谱分析

石榴石的折射率与其化学成分有关,一般来说 Fe、Mn、Cr 等重金属元素含量越大,折射率越高。所以铁铝榴石、锰铝榴石、钙铁榴石、钙铬榴石折射率较高,一般大于 1.78,在常规的折射仪上不能获得这些品种石榴石的折射率。镁铝榴石和钙铝榴石的折射率较低,一般小于 1.78,我们在常规折射仪上能获得这两种石榴石的折射率,但有些钙铝榴石由于含有一定量的 Fe,折射率增大,有时用常规的折射仪也测不到折射率。

石榴石族的红外光谱各谱带的频率和强度与石榴石的成分有密切的关系,闻轲等^[5]认为, Si—O 的谱带位置与石榴石的晶胞参数呈线性负相关关系,而晶胞参数与阳离子 A^{2+} 、 B^{3+} 大小有关,阳离子半径约大, Si—O 的谱带频率越低。石榴石端员组分的晶胞参数和折射率参见表 3;笔者收集的 15 件石榴石样品的红外光谱 Si—O 伸缩、弯曲振动的频率汇总如表 4。

从表 3 和表 4 可以看出,镁铝榴石、铁铝榴石、锰铝榴石、钙铝榴石、钙铁榴石的晶胞参数逐渐变大,其红外光谱各频带的频率也逐渐向低波数移动,这为石榴石的品种鉴定提供了可靠的鉴定依据,一般把石榴石红外光谱中的 B 带(如表 4)作为区别不同石榴石品种的一个重要谱带频率^[5]。

应该注意的是,同种石榴石的红外光谱会有微小的差异。这是由于这种品种的石榴石混溶有一定量的另一品种石榴石,造成其谱带的频率向高波数或低波数移动。如有些锰铝榴石,由于含有一定量的镁铝榴石,其红外光谱的谱带频率比纯锰铝榴石的高约 5 cm^{-1} ;一些钙铝榴石(如马里石榴石)由于含有一定量的 Fe,其红外光谱的

表 3 石榴石各端员组分的晶胞参数和折射率^[4]

Table 3 Cell parameters and reflective index of garnet end member species^[4]

端员组分	成分	折射率	比重	晶胞参数/ \AA
镁铝榴石	$\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	1.714	3.58	11.459
铁铝榴石	$\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	1.829	4.32	11.528
锰铝榴石	$\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	1.799	4.20	11.614
钙铝榴石	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	1.734	3.59	11.851
钙铁榴石	$\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	1.887	3.86	12.048
钙铬榴石	$\text{Ca}_3\text{Cr}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	1.865	3.85	11.996

表 4 不同品种石榴石的红外光谱的频率汇总表

Table 4 Summary sheet of infrared frequency of different varieties of garnets

种类	折射率	Si—O 的伸缩、弯曲振动/ cm^{-1}					
		A	B	C	D	E	F
镁铝榴石	1.735	996	915	878		589	536
	1.745	996	915	878		589	536
	1.768	995	912	876		585	535
铁铝榴石	>1.78	994	904	870		583	532
		994	902	869	638	580	530
		994	902	869	638	580	530
锰铝榴石	一般大于 1.78, 可低至 1.75	964	891	860	628	570	521
		964	891	860	628	570	521
		964	891	860	628	570	521
钙铝榴石	1.730 1.740 1.770	952	864	846	614	557	506
		952	864	846	614	557	506
		943	860	840	612	549	504
钙铁榴石	>1.78	930	837	812	584	518	480
		930	837	812	584	518	480
		930	837	812	584	518	480

谱带频率比纯钙铝榴石的低约 3 cm^{-1} 。

3.2 铝系列榴石和钙系列榴石的鉴定

铝系列榴石与钙系列榴石是两种不同系列的

石榴石,相互混溶的比例一般不大,因此从成分上能很好的区别。从红外光谱上看,铝系列石榴石的 B 带频率一般高于 870 cm^{-1} ,有些铝系列石榴

石缺失 D 带;而钙系列石榴石的 B 带频率一般低于 870 cm^{-1} ,而且一般具有 D 带。

铝系列石榴石和钙系列石榴石的色系也不一样,铝系列一般为暖色系的红色、橙色等,而钙系列的一般为冷色系的绿色。但要注意区分橙红色镁铝榴石和橙红色钙铝榴石,由于其折射率、颜色相近,肉眼很难区别,可以从红外光谱上加以区别。

3.3 钙系列石榴石间的鉴定

由于钙系列石榴石中钙铝榴石、钙铁榴石、钙铬榴石之间的类质同相替代现象较少,而且其成分、折射率、颜色、光泽有较大的差别,因此钙系列石榴石品种之间的鉴定比较简单。市场上常出现的钙系列石榴石主要是钙铝榴石和钙铁榴石,钙铁榴石的折射率、光泽要比钙铝榴石强得多,其成分也有很大的差别。应用折射率和红外光谱,很

表 5 钙铝榴石和钙铁榴石鉴定特征

Table 5 Characteristics of grossular and andradite

种类	颜色	折射率	红外光谱
钙铝榴石	沙弗莱石	深绿色	1.71~1.76,
	马里石榴石	黄绿色、褐色	有时高于 1.77
	贵榴石	深橙色、浅橙色、近无色	标准钙铝榴石, B 带位于 864 cm^{-1} 左右 峰位介于钙铝榴石与钙铁榴石间, B 带位于 860 cm^{-1} 左右
钙铁榴石	翠榴石	绿色	1.85~1.88
	黄榴石	褐色	标准钙铁榴石, B 带位于 837 cm^{-1} 左右

容易区分。

3.4 铝系列石榴石间的鉴定

铝系列石榴石中的铁铝榴石、镁铝榴石、锰铝榴石间任何两种或三种组分以任意比例混溶,因此单从颜色、不定量的成分、折射率很难确定其确定的品种。需要从颜色、折射率、红外光谱图来进行综合鉴定。

3.4.1 镁铝榴石和铁铝榴石的鉴定

据 Hoover 研究^[4],镁铝榴石与铁铝榴石一般按一定比例混溶,镁铝榴石通常含约 12%~48%的铁铝榴石,有些含有锰铝榴石;而铁铝榴石含有一定量 25%~50%的镁铝榴石。从表 2 可以看出,镁铝榴石折射率一般小于 1.76,而铁铝榴石折射率一般大于 1.78,由于铁铝榴石含 Fe 量较高,其红外光谱 B 带比镁铝榴石低 10 cm^{-1} 。表 2 可以看出,镁铝榴石一般没有 D 带,铁铝榴

石 D 带位于 638 cm^{-1} 处。所以依据折射率和红外光谱很容易区别镁铝榴石和铁铝榴石。但有些铁铝榴石由于含有一定量的镁铝榴石,其折射率降低,红外光谱中 D 带也变得非常弱,在鉴定品种时要注意区别。此外,还可以通过 B 带的位置不同来区别,如表 6。

根据我国国家标准 GB/T 16553—2010 规定,对于紫红色的镁铝榴石-铁铝榴石过渡品种,可以用红榴石来命名。

3.4.2 镁铝榴石和锰铝榴石的鉴定

镁铝榴石和锰铝榴石能以任意比例混溶,但镁铝榴石以其较低的折射率,较高频率的红外光谱 B 带和红外光谱无 D 带等特征与锰铝榴石区别。且锰铝榴石具有独特的橙色、橙红色,易与镁铝榴石区别,如表 7。

变色石榴石多见于锰铝榴石-镁铝榴石混溶

表 6 镁铝榴石和铁铝榴石的鉴定特征

Table 6 Characteristics of pyrope and almandine

种类	颜色	折射率	红外光谱
镁铝榴石	铬镁铝榴石	红色	1.73~1.76
	马来亚石榴石	红色、粉色红、褐粉色、 粉色、橙色	B 带位于 914 cm^{-1} , 无 D 带 B 带位于 914 cm^{-1} , 无 D 带
	粉彩镁铝榴石	红色	B 带位于 914 cm^{-1} , 无 D 带
	红榴石	紫红色	
铁铝榴石	红榴石	紫红色	>1.78
	铁铝榴石	暗红色	B 带位于 904 cm^{-1} , 无 D 带 B 带位于 903 cm^{-1} , D 带位于 638 cm^{-1}

表7 镁铝榴石和锰铝榴石的鉴定特征

Table 7 Characteristics of pyrope and spessartine

种类	颜色	折射率	红外光谱
镁铝榴石	铬镁铝榴石	1.73~1.76	B带位于914 cm ⁻¹ ,无D带
	马来亚石榴石		B带位于912 cm ⁻¹ ,无D带
	粉色、粉红色、褐粉色、 粉色、橙色		
	粉彩镁铝榴石		B带位于914 cm ⁻¹ ,无D带
	红榴石		
	紫红色		
锰铝榴石	锰铝榴石	>1.78	B带位于891 cm ⁻¹ ,D带位于628 cm ⁻¹

体,据 Hoover^[3],变色镁铝榴石一般折射率1.742~1.768,变色锰铝榴石一般折射率为1.751~1.792。变色镁铝榴石和变色锰铝榴石可直接命名为变色石榴石,不再细分为变色镁铝榴石和变色锰铝榴石,因此关于变色锰铝榴石和变

色镁铝榴石的鉴定本文不做讨论。

3.4.3 铁铝榴石和锰铝榴石的鉴定

铁铝榴石一般为褐红色、紫红色,锰铝榴石一般为橙红色、橙色。可依据两者间不同的颜色和红外光谱来区别,如表8。

表8 铁铝榴石和锰铝榴石的鉴定特征

Table 8 Characteristics of almandine and spessartine

种类	颜色	折射率	红外光谱
铁铝榴石	红榴石	>1.78	B带位于908 cm ⁻¹ ,无D带
	铁铝榴石		B带位于905 cm ⁻¹ ,D带位于638 cm ⁻¹
锰铝榴石	变色石榴石	1.75~1.79	B带位于899 cm ⁻¹ ,D带位于637 cm ⁻¹ ,通常弱
	锰铝榴石	>1.78	B带位于891 cm ⁻¹ ,D带位于628 cm ⁻¹

4 结论

通过对石榴石不同品种的特征进行总结,得出以下结论。

(1)石榴石品种众多,成分复杂,仅依靠一种方法,较难区别不同品种的石榴石。

(2)铝系列和钙系列石榴石之间可从颜色和红外光谱进行区别:铝系列一般为暖色系的红色、橙色等,而钙系列的一般为冷色系的绿色。铝系列石榴石B带频率一般高于870 cm⁻¹,有些此系列石榴石常缺少D带;钙系列石榴石B带频率一般低于870 cm⁻¹,而且一般具有D带。

(3)钙系列石榴石由于完全类质同相混溶较少,应用折射率和红外光谱较好区别。钙铝榴石折射率一般小于1.78,钙铁榴石折射率一般大于1.78;钙铝榴石的红外光谱B带一般在864 cm⁻¹

左右,而钙铁榴石的B带一般在837 cm⁻¹左右。

(4)铝系列石榴石完全类质同相较多,颜色、折射率、红外光谱相近,需要熟悉铝系列石榴石中镁铝榴石、铁铝榴石、锰铝榴石的特征,综合颜色、折射率和红外光谱特征,才能进行准确的判定。

参考文献:

- [1] 陈丁滢. 运用X射线荧光光谱法对石榴石分类鉴定[J]. 上海计量测试, 2007, 34(6): 11-13.
- [2] 范建良, 刘学良, 郭守国, 等. 石榴石族宝石的拉曼光谱研究及鉴别[J]. 应用激光, 2007, 27(4): 310-313.
- [3] 张蓓莉. 系统宝石学[M]. 2版. 北京: 地质出版社, 2006: 270-280.
- [4] Hoover D B. Determining garnet composition from magnetic susceptibility and other properties[J]. Gems & Gemology, 2011, 47(4): 272-285.
- [5] 闻轲, 梁婉雪, 章正刚, 等. 矿物红外光谱学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1988: 74-77.

(责任编辑: 万绮娟)