

张勇, 周丹怡, 陈华, 等. 应用同步辐射技术解析黄色-红色石英质玉石中的致色矿物[J]. 岩矿测试, 2016, 35(5): 513-520.
ZHANG Yong, ZHOU Dan-yi, CHEN Hua, et al. Investigation of Color Causing Minerals in Yellow-Red Colored Quartzite Jade Using the Synchrotron Radiation Technique[J]. Rock and Mineral Analysis, 2016, 35(5): 513-520. [DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.2016.05.010]

应用同步辐射技术解析黄色-红色石英质玉石中的致色矿物

张勇, 周丹怡, 陈华, 陆太进, 柯捷
(国土资源部珠宝玉石首饰管理中心, 北京 100013)

摘要: 质地细腻、颜色多彩的隐晶质-微粒脉石英在我国珠宝行业称为石英质玉石, 颜色是石英质玉石价值判断的主要因素之一, 揭示其致色矿物及致色机理对于研究石英质玉石的颜色评价指标和矿床成因具有重要意义, 但前人并未直接获得致色矿物的准确信息。本文运用上海光源(SSRF) BL15U1线站的同步辐射硬X射线, 使用 μ -XRF和 μ -XRD技术对黄色和红色隐晶质-微粒脉石英中的致色矿物进行了研究。结果表明, 黄色石英质玉石由赋存于石英颗粒间或微裂纹中的针铁矿(特征衍射峰0.49574、0.41594、0.26887、0.25705、0.25189、0.24510、0.21806、0.17133 nm)或其集合体致色; 红色石英质玉石由赋存于石英颗粒间或微裂纹中的赤铁矿(特征衍射峰0.36774、0.27091、0.25200 nm)或其集合体致色, 黄色-红色石英质玉的颜色由针铁矿和赤铁矿共同致色, 赤铁矿的显色能力要高于针铁矿。本文获得了石英质玉石中致色矿物的直接数据, 为玉石结晶温度与致色机理的探讨、石英质玉石的品质评价提供了依据。

关键词: 同步辐射技术; 脉石英; 颜色成因; 针铁矿; 赤铁矿

中图分类号: P575.5; P578.44; P578.497 **文献标识码:** A

质地细腻、颜色丰富的隐晶质-微粒脉石英, 在国内被广泛地作为玉石使用(珠宝业界称其为石英质玉石), 由于产地较多, 其商业名称也很多, 诸如黄龙玉、霍山玉、大别山玉、黄山玉、荔枝冻、金丝玉、阿拉善玉等等^[1-4]。黄色和红色是石英质玉石最常见的颜色, 石英质玉石颜色评价指标的确立有赖于致色矿物的正确揭示, 致色矿物对矿床成因也有很重要的指示意义, 所以致色矿物和致色机理成为了学者关注的热点问题。前人认为黄色和红色的石英质玉主要由Fe的氧化物或者氢氧化物致色^[5-8], 但由于近乎单矿物岩石的隐晶质-微粒脉石英质玉中的致色矿物颗粒含量非常低, 而且粒径非常细小, 所以红外光谱、拉曼光谱、X射线衍射(XRD)等常规设备难以准确鉴定^[6-10], 电子探针虽然可以检测到Fe矿物, 但都是以Fe的氧化物的形式予以数据输出, 所以不适用Fe的氧化物或者氢氧化物的鉴定^[11]。前人虽然对黄色-红色石英质玉石的致色原因进行了推测或者少量的测试研究^[1,5-8], 但

未有人直接揭示其致色矿物及致色机理。

上海同步辐射装置(简称上海光源:SSRF)属于第三代中能同步辐射装置, 是迄今为止此研究领域我国国家级的大科学装置^[12], 其光源具有灵敏度高、空间分辨率高、检测限低等其他设备无法相比较的特点, 相对于常规的X光源, 同步辐射X射线光源能量强度高, 具有很好的准直性, 光束线光斑可达微米至亚微米级, 可以分析微小样品或微区的结构、元素组分和分布, 对于检测鉴定细小的矿物, 具有很好的优势^[13-15]。为了获得隐晶质-微粒脉石英中Fe矿物直接的测试数据, 本文选取云南省龙陵县、安徽省霍山县、广西壮族自治区贺州市所产的典型样品, 使用偏光显微镜先期对样品岩石薄片进行了观察, 选取特征区域, 运用上海光源(SSRF) BL15U1线站同步辐射硬X射线的 μ -XRF和 μ -XRD技术^[16], 对样品中的致色元素以及致色矿物进行了分析测试, 获得了致色矿物的准确种属信息。

收稿日期: 2016-01-13; 修回日期: 2016-05-02; 接受日期: 2016-05-20

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项经费项目(201011005-2B)

作者简介: 张勇, 硕士, 宝石学专业, 主要从事珠宝玉石首饰研究工作。E-mail: zyongbj@126.com。

1 实验部分

1.1 实验样品及处理

本次测试样品采自于云南省龙陵县、安徽省霍山县和广西壮族自治区贺州市(图1)。①黄色石英质玉石(样品编号:HLY-XHS-17、HSY-8、HSY-29、HZ-C-30)的颜色分布相对比较均匀,其中HLY-XHS-17和HSY-8样品的结构最为致密,颜色最为鲜艳,HSY-29和HZ-C-30样品是次生矿,其结构相对比较疏松,颜色偏暗,且接近表面部位的颜色较深。②红色石英质玉石(样品编号:HSY-10、HSY-100)的颜色分布也相对比较均匀,HSY-10样品中有明显的条带结构,红色致色矿物的分布与条带结构具有较为模糊的关系,HSY-100样品边缘位置的颜色浓度要高于块体中心位置颜色的浓度;③YN-31样品颜色条带比较分明,块体边缘位置为黄色,往块体中心位置,逐渐变化为红色,最后大部分区域为白色。④其他样品(样品编号:HLY-XDX-13、HZ-J-2-1、HZ-J-2-2、HZ-J-6)中的黄色和红色致色矿物相互混杂在一起,尤其是HZ-J-2-2样品中的红色致色矿物呈点状或者团块状分布在整体呈黄色的岩石基底中,HZ-J-2-1和HZ-J-6样品中的黄色和红色致色矿物呈点状或者团块状分布在白色的石英

质玉石基底中,一个很明显的特点是HZ-J-2-1、HZ-J-2-2和HZ-J-6样品中,石英质玉石与围岩接触部位都呈现红色。这些样品中黄色和红色致色矿物相互混杂分布的规律,代表了大部分石英质玉石的颜色分布特征。

为了精确测量,将样品先磨制成0.03 mm厚的岩石薄片,岩石薄片与载玻片之间用的是502胶水。测试之前用丙酮浸泡岩石薄片和载玻片,使岩石薄片和载玻片脱离。由于岩石薄片太薄,与载玻片脱离之后发生了卷曲,为此使用胶条,将岩石薄片固定在金属测试架上进行测试。

1.2 实验仪器及测量条件

(1)光学显微镜观察:使用OLYMPUS BX51 偏光显微镜对岩石薄片进行了光学显微镜观察,显微图像采集过程中,使用了透反射偏光。对研究样品中颜色富集的区域进行了圈定,以便于准确测试。

(2)同步辐射硬X射线测试:上海光源的BL15U1为插入件光束线,采用高亮度的波荡器硬X射线光源,通过单色器、K-B聚焦镜得到X射线微束,本次测试入射光光子能量为20 keV,聚焦光斑为 $3\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$,入射X射线宽度(I_0)数值为0.280。本次实验中,使用微束X射线荧光($\mu\text{-XRF}$)对样品中Fe元素的微区分布进行了面



图1 研究样品

Fig. 1 The investigated samples

扫描,使用微束X射线衍射(μ -XRD)对样品中的致色矿物进行了单点测试。

2 结果与讨论

2.1 偏光显微镜分析致色矿物的形态及分布特征

显微镜照片(图2)显示,研究样品的主要组成矿物为粒状石英,粒径大小主要为 $5 \sim 20 \mu\text{m}$,只有HSY-29样品的石英颗粒稍大一些,可达 $50 \mu\text{m}$,所以研究样品为隐晶质-微粒石英质玉石^[17]。在石英颗粒之间,赋存有黄色和红色矿物,这些黄色和红色的矿物颗粒度非常小,利用光学显微镜,即使在1000倍的放大倍率下,也很难看清楚具体的晶体尺寸以及矿物晶体形态。

HZ-J-2-1号样品,其肉眼观察原本表现出黑色的条带,磨成岩石薄片,在光学显微镜下显示为红色(图2i),可见是由于红色的矿物堆积过于紧密,导致其颜色成为黑色^[18];YN-31号样品的黄色和红色矿物分布有分层的特点;HZ-J-2-2(图2j)与HZ-J-6(图2k)号样品的显微图像显示,黄色和红色的致色矿物同时出现在了细粒石英质玉石之中,黄色和红色矿物在富集区,含量具有从中心向周围逐渐减少的趋势,中心区域致色矿物的

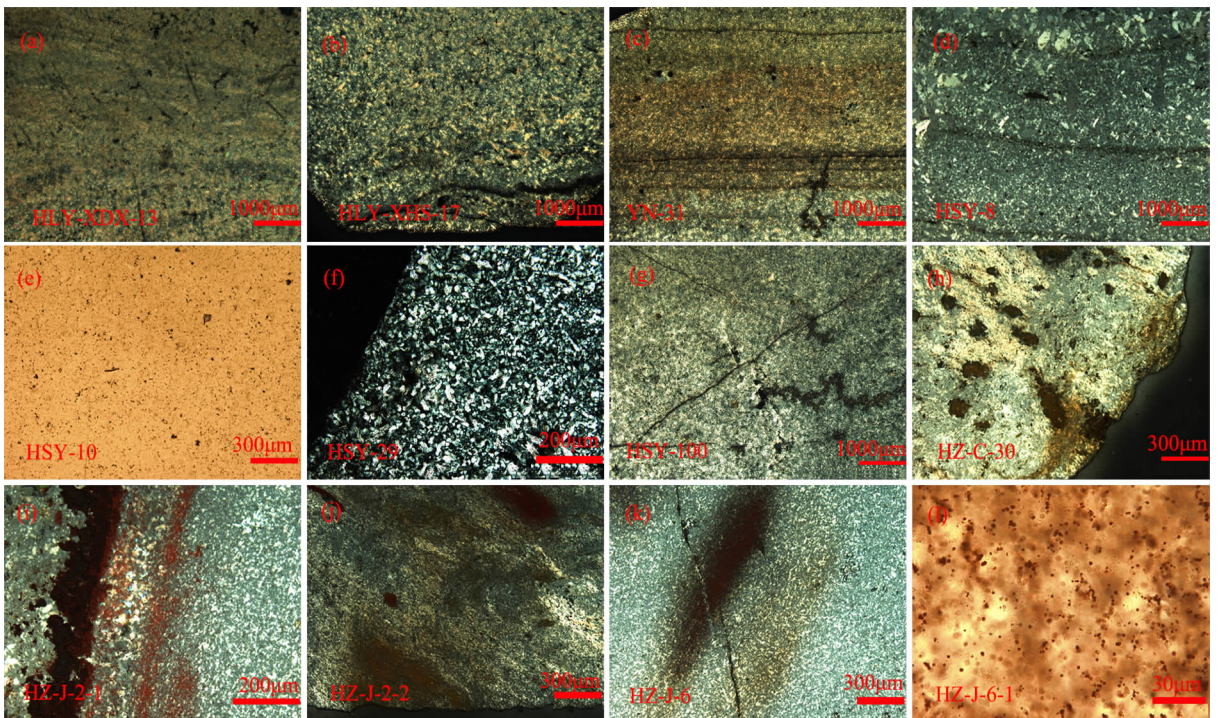
含量最高;HZ-J-6-1(图2l)展示了HZ-J-6(图2k)号样品中红色矿物的赋存状态,红色矿物呈球状集合体的形式较为均匀地分布在石英颗粒之间,球粒的直径介于 $0.5 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 之间,其单晶体的直径则更为细小,或者不存在单体^[8,19]。

HZ-C-30(图2h)边界处可见微裂隙,微裂隙中充填有黄色的矿物质,在微裂隙周围,可见黄色的矿物质由裂隙处向周围扩散,其富集度(含量)逐渐减少,这个现象说明黄色的矿物质很有可能来自后期外界物质的渗入^[7]。HSY-8号样品的显微图像(图2d)显示了条带状的结构,非常细的条带穿插在粒径相对比较大的石英颗粒之间^[7]。

2.2 μ -XRF分析Fe元素在石英质玉石中分布特征

选取样品中黄色和红色颜色富集区域,以及颜色富集区域与无色区域交界边缘位置,使用BL15U1实验站微束X射线荧光光谱分析(μ -XRF)的面扫描功能,对研究样品中Fe元素的分布规律进行了分析(图3)。 μ -XRF面扫描数据直接以颜色差异来显示测试元素的分布特征(图3),红色代表Fe含量最高,蓝色代表铁含量最低,接近0。

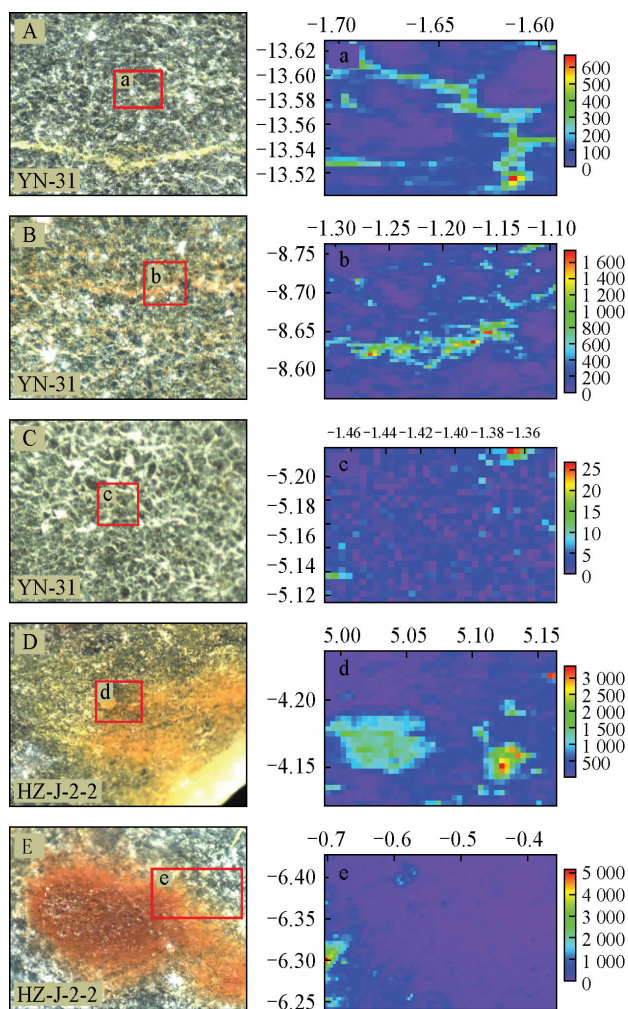
YN-31黄色部位(图3A)和红色部位(图3B),铁元素围绕石英颗粒分布,石英内部基本



a,b,c,d,f,g为正交偏光照片;e,l为单偏光照片;h,i,j,k为反射偏光照片。

图2 显微照片

Fig.2 The microphotographs of the samples



A、B、C、D、E为可见光显微图像,a、b、c、d、e为可见光显微图像中红色方框区域的Fe元素分布图。

图3 Fe元素的 μ -XRF的面扫描图像

Fig. 3 The scanned images of Fe element by μ -XRF

不含铁元素(图3a、b);YN-31白色部分(图3C),石英颗粒之间基本不含有Fe元素,局部区域分布有少量Fe元素(图3c);HZ-J-2-2中的致色矿物有富集分布的特点,黄色矿物(图3D)和红色矿物(图3E)的含量,由中心区域逐渐向周围区域扩散(图3d、e),铁含量逐渐降低^[5-8]。

μ -XRF面扫描的结果显示,石英质玉石中黄色或者红色的出现,直接与Fe元素相关,或者说石英质玉石中的黄色和红色,是由赋存于石英颗粒间的Fe元素致色。

2.3 μ -XRD分析致色矿物的种属

选取样品中黄色和红色矿物最富集的区域进行 μ -XRD单点分析,利用Fit2D软件将测试得到的衍射环转换成衍射谱线,选取典型图谱进行了解析(图4)。根据本次研究中 μ -XRF面扫描的数据以

及前人研究成果^[5-8],黄色和红色石英质玉石主要由Fe的氧化物或者氢氧化物致色,所以 μ -XRD数据分析过程中仅关注了衍射谱线中与石英和铁矿物相关的特征峰。所有测试结果中,石英的特征峰强度非常高,针铁矿和赤铁矿峰的低^[20]。

HLY-XDX-13号样品黄色区域(图4a)在0.44840、0.42522、0.33398、0.26620、0.25632、0.24518、0.22815、0.22356、0.21275、0.19833、0.19309、0.18162、0.16622、0.15410 nm等处出现了一系列的特征衍射峰。最强峰0.33398 nm以及其他多数特征峰属于石英的特征衍射峰(PDF:33-1161);0.25632 nm属于针铁矿的特征衍射峰(PDF:29-0713);0.24518 nm和0.16622 nm是由石英和针铁矿共同产生的衍射峰,或者此处石英峰太强,将针铁矿的特征衍射峰给遮盖了;0.19309 nm可能是纤铁矿的衍射峰(PDF:44-1415)。

HZ-J-2-2号样品黄色区域(图4b)在0.49574、0.42563、0.41594、0.33402、0.26887、0.25705、0.25189、0.24510、0.22848、0.22327、0.21806、0.21288、0.19333、0.18159、0.17133、0.16725、0.15427 nm等处出现了一系列的特征衍射峰。最强峰0.33402 nm以及其他多数特征峰属于石英的特征衍射峰(PDF:33-1161);0.49574、0.41594、0.26887、0.25705、0.25189、0.24510、0.21806、0.17133 nm属于针铁矿的特征衍射峰(PDF:29-0713);0.19333 nm可能是纤铁矿的衍射峰(PDF:44-1415)。

HLY-XDX-13号样品红色区域(图4c)在0.44830、0.42624、0.36774、0.33398、0.27091、0.26616、0.25577、0.25200、0.24541、0.22845、0.19851、0.19327、0.18162、0.16685、0.15417 nm等处出现了一系列的特征衍射峰。最强峰0.33398 nm与其他一些峰属于石英的特征衍射峰(PDF:33-1161);0.36774、0.27091、0.25200 nm属于赤铁矿的特征衍射峰(PDF:33-0664);0.19327 nm可能是由纤铁矿引起的(PDF:44-1415)。

YN-31号样品红色区域(图4d)在0.44750、0.43377、0.42541、0.36662、0.33391、0.27014、0.25576、0.25187、0.24538、0.23800、0.22838、0.22319、0.22078、0.21281、0.19807、0.19335、0.18153、0.16741、0.15418 nm等处出现了一系列的特征衍射峰。最强峰0.19335 nm可能是纤铁矿的衍射峰(PDF:44-1415);0.33391、1.6741 nm等强度较强的峰,都是石英的特征衍射峰(PDF:33-1161);0.36662、0.27014、0.22078 nm都是赤铁矿的特征衍射峰(PDF:33-0664)。

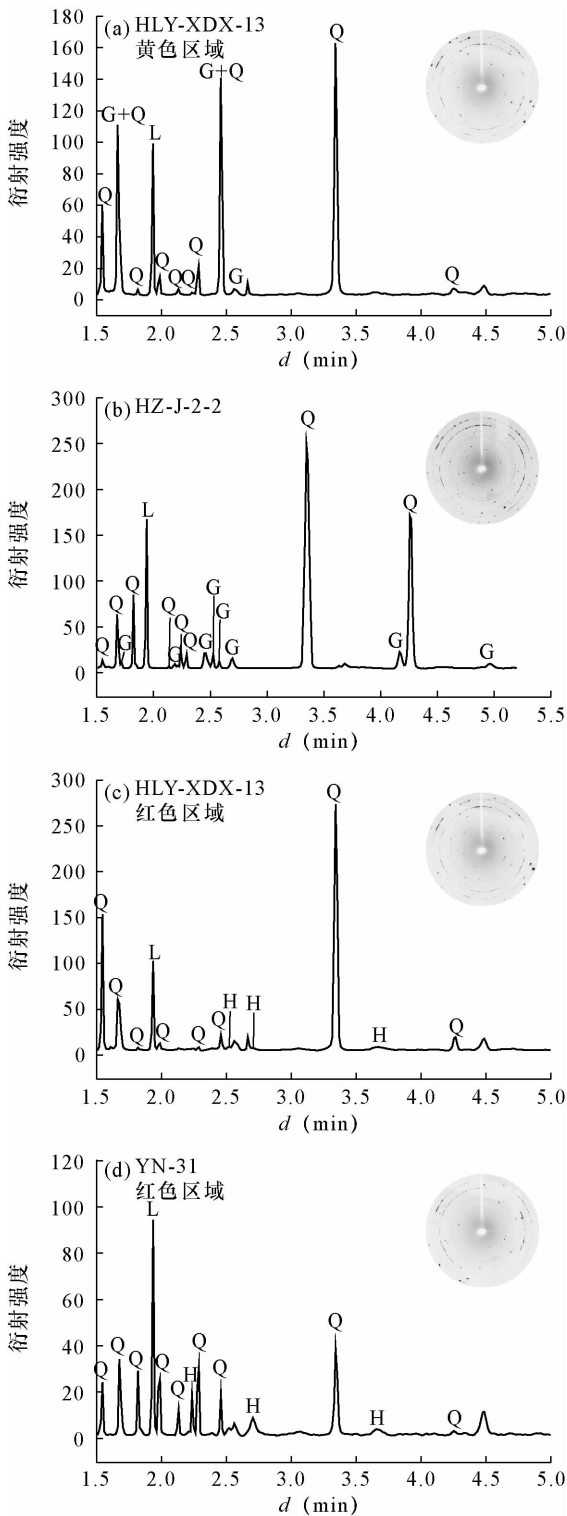


图4 μ -XRD 测试结果显示黄色-红色隐晶质-微粒石英质玉石主要由石英(Q)、针铁矿(G)和赤铁矿(H)组成,可能存在纤铁矿(L)

Fig. 4 The results of μ -XRD show that the yellow-red colored cryptocrystalline-microcrystalline vein quartzite are mainly consisted of quartz (Q), goethite (G) and hematite (H), perhaps lepidocrocite (L) also exists in samples

3 石英质玉石致色矿物及致色机理研究

3.1 致色矿物

结合光学显微照片以及同步辐射 μ -XRF 面扫描图像,可知研究样品中 Fe 的氧化物和氢氧化物富集于石英颗粒之间,或者沿裂隙分布。根据样品中石英和铁矿物的相互结合关系以及晶体形态,可知红色和黄色的致色矿物,其物质来源有两种方式:一种物质来源与石英质玉石的物质来源一致,同属热水溶液成因,该种成因的铁氧化物和氢氧化物分布无特定规律,可能由溶液直接结晶或者胶体作用形成^[19],通常颜色的明度值比较高;另外一种是在石英质玉石形成以后,铁的氧化物和氢氧化物通过淋滤作用进入石英质玉石中,主要富集于裂隙以及结构疏松处^[7,21]。

从偏光显微镜照片(图2)和同步辐射可见光照片(图3A~E)可以观察到,黄色和红色的石英质玉石,其石英颗粒为无色透明,总体上颜色主要受石英颗粒间的致色矿物控制。当致色矿物为红色时,石英质玉石表现出来的就是红色调;当致色矿物为黄色时,石英质玉石表现出来的就是黄色调。利用同步辐射 μ -XRD,可知黄色的致色矿物为针铁矿,红色的致色矿物为赤铁矿。

3.2 致色机理

根据本文的实验数据,石英质玉石中的石英无色透明,黄色的石英质玉石主要由针铁矿致色,红色的石英质玉石主要由赤铁矿致色,白色石英质玉石不含铁矿物或者铁矿物含量很低(图3C和图3c),本次实验结果,与前人对其他岩石的研究成果一致^[6,22-24]。前人研究成果显示^[18],当针铁矿的颗粒大小为 $0.3 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 时,颜色为黄色,当其大小为 $0.05 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 时,颜色为深黄色;当赤铁矿的颗粒小于 $0.1 \mu\text{m}$,颜色为橙色,当其大小为 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 时,颜色为红色;当针铁矿和/或赤铁矿以非常密集的方式结合在一起时,整体表现出黑色或者深褐色。虽然从研究样品的显微图像中无法测量针铁矿或者赤铁矿的晶体尺寸,但是根据前人研究成果,可以大概判断针铁矿和赤铁矿的晶体大小为亚微米或者纳米级别,甚至不存在单体,主要以集合体的形式存在于石英质玉石中^[8,19]。从样品可知,黄色和红色的颜色明度都不一样,产于广西贺州石英质玉石中的针铁矿和赤铁矿明度要明显高于其他产地,这种明度的变化主要受针铁矿或者赤铁矿晶体(集合体)的大小,及其结合的紧密程度的控制。往往红色赤铁矿的显色能力要远远强于黄色的针铁矿^[8,18],所以很多黄色石英质玉石中,即使含有赤铁

矿的量非常少,外观感觉上也会存在红色调。

红色的赤铁矿的形成温度,通常要比黄色的针铁矿高。在热水溶液中,如果温度在 37 ~ 55℃ 之间,主要形成针铁矿;如果温度高于 55℃,则以形成赤铁矿为主;温度高于 150℃ 时,赤铁矿的生长速度将很快^[18,25-26]。针铁矿在 200℃ 左右开始脱水向赤铁矿转变,超过 230℃ 后,针铁矿将彻底转变为赤铁矿^[10,27]。本次研究样品中,YN-31 号样品,其红色区域与黄色区域具有明显的界线,但是红色区域介于黄色和白色之间,可反映出该样品经过了多期次的生长过程;HSY-8 号样品典型的黄色,显示了其很低的形成温度;HSY-10 样品以红色为主,夹杂有黄色,可见其形成温度也较低;HSY-100 样品,中心部位的颜色浅,边缘部位的颜色比中心部位的颜色深,说明了其在形成过程中可能经历了温度逐渐变化的过程,或者其在形成之后经历了相对的高温环境,使石英质玉石接近热源部位的赤铁矿含量增加;HZ-J-2-1 和 HZ-J-6 样品中,黄色和红色分别呈点状或者团块状分布于石英质玉石中, HZ-J-2-2 样品中红色呈点状分布于黄色之中,这三个标本的共同特点是,石英质玉石与围岩接触的部位颜色都以红色为主,这个现象说明了在石英质玉石形成的过程中,围岩的温度相对较高,热水溶液或者胶体的温度较低,且热水溶液或者胶体中物质分布不均匀。

4 结论

本文利用同步辐射 μ -XRF 和 μ -XRD 技术直接获得了 Fe 元素在黄色-红色石英质玉石中的分布规律,证明了石英颗粒中基本不含有 Fe 元素, Fe 元素主要富集于石英颗粒之间;黄色石英质玉主要由针铁矿或其集合体致色,红色石英质玉主要由赤铁矿或其集合体致色,黄色-红色石英质玉的颜色由针铁矿和赤铁矿共同致色,赤铁矿的显色能力要高于针铁矿。本文的研究成果获得了石英质玉石中致色矿物的直接数据,对玉石结晶温度与致色机理的探讨都很有价值,对石英质玉石的品质评价也具有重要的指导意义。

本文所使用的测试方法,解决了近乎单矿物岩石——石英质玉中致色矿物鉴定的问题,可为其他岩石中细小微量的杂质矿物的鉴定提供思路。但是由于本方法无法准确提供致色矿物的尺寸和晶体形态信息,其显色机理还需要进一步研究。

致谢:感谢上海同步辐射装置(简称上海光源:SSRF)张丽丽等给予的实验测试支持。

5 参考文献

- [1] 张勇,刘伦贵,罗光连,等. “霍山玉”的宝石学特征 [C]. 中国珠宝玉石首饰学术交流会议论文集, 2013: 222-225.
Zhang Y, Liu L G, Luo G L, et al. The Gemological Properties of ‘Huoshan Jade’ [C]. Proceedings of China Gems & Jewelry Academic Conference, 2013: 222-225.
- [2] 张勇,陆太进,陈华. 阿拉善戈壁玛瑙的显微特征 [C]. 中国珠宝玉石首饰学术交流会议论文集, 2015: 182-184.
Zhang Y, Lu T J, Chen H. The Microstructures of Agate from Alxa League Gobi Desert, China [C]. Proceedings of China Gems & Jewelry Academic Conference, 2015: 182-184.
- [3] 陈华,柯捷,周丹怡,等. 从我国不同商品名称石英质玉石的宝石学特征探讨其定名 [C]. 中国珠宝玉石首饰学术交流会议论文集, 2015: 161-171.
Chen H, Ke J, Zhou D Y, et al. Discussion on the Nomenclature of Quartzose Jade with Different Commodity Names in China Based on the Gemological Characteristics [C]. Proceedings of China Gems & Jewelry Academic Conference, 2015: 161-171.
- [4] 周丹怡,陈华,陆太进,等. 基于拉曼光谱-红外光谱-X射线衍射技术研究斜硅石的相对含量与石英质玉石结晶度的关系 [J]. 岩矿测试, 2015, 34(6): 652-658.
Zhou D Y, Chen H, Lu T J, et al. Study on the Relationship between the Relative Content of Moganite and the Crystallinity of Quartzite Jade by Raman Scattering Spectroscopy, Infrared Absorption Spectroscopy and X-ray Diffraction Techniques [J]. Rock and Mineral Analysis, 2015, 34(6): 652-658.
- [5] 田隆. 五颜六色的黄龙玉及致色机理 [J]. 岩矿测试, 2012, 31(2): 306-311.
Tian L. Coloring Mechanism of Huanglong Jade [J]. Rock and Mineral Analysis, 2012, 31(2): 306-311.
- [6] 杜杉杉,殷科,韩文,等. 一种商业名为“金丝玉”的矿物学特征 [J]. 宝石和宝石学杂志, 2014, 16(4): 49-53.
Du S S, Yin K, Han W, et al. Mineralogical Characteristics of ‘Jinsiyu’ (Quartz) [J]. Journal of Gems and Gemmology, 2014, 16(4): 49-53.
- [7] 张勇,陆太进,杨天畅,等. 石英质玉石的颜色分布及其微量元素分析 [J]. 岩石矿物学杂志, 2014, 33(增刊): 83-88.
Zhang Y, Lu T J, Yang T C, et al. A Study of Quartzite Jade’s Color and Trace Elements [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2014, 33(Supplement): 83-88.
- [8] 张勇,魏然,柯捷,等. 黄色和红色石英质玉石的颜色成因研究 [J]. 岩石矿物学杂志, 2016, 35(1): 139-146.

- Zhang Y, Wei R, Ke J, et al. Coloration of Yellow and Red Colored Quartzite Jade [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2016, 35(1): 139 - 146.
- [9] Balsam W, Ji J F, Renock D, et al. Determining Hematite Content from NUV/Vis/NIR Spectra: Limits of Detection [J]. *American Mineralogist*, 2014, 99(11 - 12): 2280 - 2291.
- [10] 周玮, 季峻峰, Balsam W, 等. 利用漫反射光谱鉴定红粘土中针铁矿和赤铁矿[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(4): 730 - 736.
- Zhou W, Ji J F, Balsam W, et al. Determination of Goethite and Hematite in Red Clay by Diffuse Reflectance Spectroscopy [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(4): 730 - 736.
- [11] 王轶, 常娜, 刘亚非, 等. 应用 X 射线衍射-激光拉曼光谱-电子探针等分析测试技术研究旬阳朱砂玉的矿物学特征[J]. *岩矿测试*, 2014, 33(6): 802 - 807.
- Wang Y, Chang N, Liu Y F, et al. Study on the Mineralogical Characteristics of Cinnabar Jade by X-ray Powder Diffraction-Laser Raman Spectroscopy-Electron Probe from Xunyang, Shannxi Province [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2014, 33(6): 802 - 807.
- [12] 肖体乔, 谢红兰, 邓彪, 等. 上海光源 X 射线成像及其应用研究进展[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 1 - 15.
- Xiao T Q, Xie H L, Deng B, et al. Progresses of X-ray Imaging Methodology and Its Applications at Shanghai Synchrotron Radiation Facility [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 1 - 15.
- [13] 张延乐, 余笑寒. 上海光源 BL15U1 束线的 SRXRF 定量分析[J]. *核技术*, 2010, 33(5): 334 - 337.
- Zhang Y L, Yu X H. Quantitative SRXRF Analysis on the BL15U1 Beamline at SSRF [J]. *Nuclear Techniques*, 2010, 33(5): 334 - 337.
- [14] 李国强, 梁东旭, 闫芬, 等. 利用光强反馈提高上海光源 BL15U 线站光束位置的稳定性[J]. *核技术*, 2013, 36(5): 1 - 4.
- Li G Q, Liang D X, Yan F, et al. Improve Beam Position Stability of SSRF BL15U Beamline by Using Beam Intensity Feedback [J]. *Nuclear Techniques*, 2013, 36(5): 1 - 4.
- [15] Zhang L L, Yan S, Jiang S, et al. Hard X-ray Microfocusing Beamline at SSRF [J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2015, 26(6): 1 - 8.
- [16] 张继超, 梁东旭, 何燕, 等. 硬 X 射线微米探针高精度样品定位系统[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(2): 557 - 561.
- Zhang J C, Liang D X, He Y, et al. High Accuracy Sample Positioning System for Hard X-ray Microprobe [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(2): 557 - 561.
- [17] 路凤香, 桑隆康编著. 岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 28.
- Lu F X, Sang L K. *Petrology* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 28.
- [18] Cornell R M, Schwertmann U. *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Use (2nd Edition)* [M]. WILEY-VCH, 2003: 130 - 137, 173 - 175, 350 - 355.
- [19] 赵珊茸编著. 结晶学及矿物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 199 - 200.
- Zhao S R. *Crystallography and Mineralogy* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 199 - 200.
- [20] 于吉顺, 雷新荣, 张锦化等. 矿物 X 射线粉晶鉴定手册[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011.
- Yu J S, Lei X R, Zhang J H, et al. *Manual of X-ray Powder Mineral Identification* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2011.
- [21] 张勇, 柯捷, 陆太进, 等. 黄色石英质玉石中“水草花”的物质组成研究[M]. *宝石和宝石学杂志*, 2012, 14(3): 1 - 5.
- Zhang Y, Ke J, Lu T J, et al. Study on Ingredients of Dendrite Pattern in Yellow Quartzite Jade [M]. *Journal of Gems and Gemmology*, 2012, 14(3): 1 - 5.
- [22] 韩文, 洪汉烈, 吴钰, 等. 和田玉糖玉的致色机理研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(6): 1446 - 1450.
- Han W, Hong H L, Wu Y, et al. Color Genesis of Brown Jade from Hetian Nephrite [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(6): 1446 - 1450.
- [23] 李响, 蔡元峰. 白垩纪大洋红层的致色机制及成因研究[J]. *矿物学报*, 2014, 34(4): 451 - 460.
- Li X, Cai Y F. The Colouration Mechanism and Genetic Study of Cretaceous Oceanic Red Beds [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2014, 34(4): 451 - 460.
- [24] 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.
- Wang H, Zhou Z Y, Zhong Q, et al. Study on Petrological and Mineralogical Characteristics of Laos Stone by EPMA-XRD-SEM [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2016, 35(1): 56 - 61.
- [25] Wang M K, Hsu P H. Effects of Temperature and Iron (III) Concentration on the Hydrolytic Formation of Iron (III) Oxyhydroxides and Oxides [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44: 1089 - 1095.
- [26] Riveros P A, Dutrizac J E. The Precipitation of Hematite from Ferric Chloride Media [J]. *Hydrometallurgy*, 1997,

46:85–104.

[27] Ruan H D, Frost R L, Klopvogge J T. The Behavior of Hydroxyl Units of Synthetic Goethite and Its

Dehydroxylated Product Hematite [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2001, 57:2575–2586.

Investigation of Color Causing Minerals in Yellow-Red Colored Quartzite Jade Using the Synchrotron Radiation Technique

ZHANG Yong, ZHOU Dan-yi, CHEN Hua, LU Tai-jin, KE Jie

(National Gems & Jewelry Technology Administrative Center, Ministry of Land and Resources, Beijing 100013, China)

Highlights:

- Yellow-red quartzite jade is colored by goethite and hematite.
- Iron element is concentrated at quartz grain boundaries in yellow-red vein quartzite jade.
- The μ -XRF and μ -XRD techniques could be found wide application in the identification of finer minerals and particles in gem materials.

Abstract: Jade-like cryptocrystalline-microcrystalline vein quartzite is called quartzite jade in the jewel business of China. Color is the main criteria for the value of quartzite jade, and therefore studying the coloration mechanism is very important for the color evaluation index and ore genesis. Previous studies have shown that the accurate information of color causing minerals cannot be acquired. The synchrotron radiation techniques, BL15U1 in SSRF equipped with μ -XRF and μ -XRD at SSRF were used for studying the color causing minerals in vein quartzite and are reported in this paper. It was found that yellow vein quartzite is colored by goethite (characteristic diffraction peaks at 0.49574, 0.41594, 0.26887, 0.25705, 0.25189, 0.24510, 0.21806, 0.17133 nm), whereas red quartzite is colored by hematite (characteristic diffraction peaks at 0.36774, 0.27091, 0.25200 nm). Yellow-red quartzite is colored by both goethite and hematite and hematite has a stronger coloration ability than goethite. This study provides direct data of the color causing minerals in quartzite jade, which is useful for discussing the crystallization conditions and the coloration mechanism, and also helpful for the quality evaluation of quartzite jade.

Key words: synchrotron radiation technique; vein quartzite; coloration; goethite; hematite

