

缅甸硬玉岩中硬玉矿物的结构水表征

邢莹莹

(华南理工大学广州学院 珠宝学院, 广东 广州 510800; 中国地质大学 材料与化学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 本文介绍了名义上无水的辉石族矿物中结构水的研究现状,特别是硬玉矿物的结构水红外表征和含量。且笔者以缅甸硬玉岩为研究对象,使用显微红外光谱、电子探针等测试手段,从微观角度研究其中硬玉矿物的结构水表征。研究表明:缅甸硬玉岩中硬玉矿物的结构水在红外光谱中主要表征为 $3\,610\sim 3\,620\text{ cm}^{-1}$ 和 $3\,540\sim 3\,550\text{ cm}^{-1}$ 两个区域的吸收峰,且结构疏松的硬玉岩中硬玉矿物的结构水含量呈现外侧多中间少,结构致密的硬玉矿物的结构水含量各部位较为均一。结构水的含量差异和变化趋势可能是硬玉岩形成时板块俯冲和折返过程中的流体参与作用的结果,进一步为缅甸硬玉岩成因提供了的佐证。

关键词: 结构水;硬玉;硬玉岩;显微红外光谱

中图分类号: P619.28⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)01-0087-10

The constitutional water of jadeite minerals in jadeitite from Myanmar

XING Ying-ying

(Gemological Institute, Guangzhou College of South China University of Technology, Guangzhou 510800, China;
Faculty of Materials Science and Chemistry, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper describes the research status of constitutional water in nominally anhydrous pyroxene group minerals, especially the FTIR characterization and content of constitutional water of jadeite in different rocks. The jadeite minerals from Myanmar were investigated by using micro-FTIR and electron microprobe analysis (EPMA), and the constitutional water characterization of jadeite minerals from Myanmar was studied microcosmically. According to the results achieved, the constitutional water of jadeite minerals from Myanmar is characterized by spectral peaks in the range of $3\,610\sim 3\,620\text{ cm}^{-1}$ and $3\,540\sim 3\,550\text{ cm}^{-1}$ on the infrared spectra, the content of constitutional water of jadeite minerals in loose structure jade is higher on the outer side and less in the middle, and the constitutional water content in various parts of jadeite minerals with compact structure is fairly homogeneous. Content difference and change trend of constitutional water are not affected by its chemical composition, and probably result from such factors as fluid involvement in diagenesis, jade forming stage and plate subduction and exhumation process. The results achieved by the authors provide a certain basis for the genetic study of Myanmar jade.

Key words: constitutional water; jadeite; jadeitite; micro-FTIR

近年来大量的研究表明,许多名义上无水矿物的结构之中含有微量的氢,氢以 OH^- 或 H_2O 的形式赋存,其含量从几到 $n\times 10^{-6}$ 到 $n\times 10^{-3}$,这些矿物被称为名义上无水矿物,简称 NAMs。虽然这种形

式的水含量一般都很低,却能够改变矿物的物理、化学性质,改变岩石的热力学过程。大量研究证明辉石中普遍含有结构水,并通过不同产地、不同类型岩石中辉石结构水的测定与计算解释了岩石的成因问题。

世界上已知的硬玉岩矿床产地极少,仅发现于缅甸西北部帕敢(Parkhan)硬玉岩带(包括 Longkin 和 Tawmaw)、日本的 Kotaki 地区和 Oo sacho、美国加州 San Benito、俄罗斯的 Polar Urals 和 PayYer 地区、哈萨克斯坦的 NearBalkash 北部地区以及危地马拉的 Motagua 断裂两边,其中具有商业开采价值的硬玉岩原生矿主要产自缅甸西北部帕敢地区。缅甸硬玉岩的主要组成矿物硬玉 $\text{NaAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ 为辉石族矿物,该族矿物的通式为 $\text{XY}[\text{Si}_2\text{O}_6]$,其中 X(占据 M_2 位)为 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Li^+ ,Y(占据 M_1 位)为 Fe^{3+} 、 Cr^{3+} 、 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 、 Ti^{4+} 。硬玉中由 $[\text{SiO}_4]^-$ 四面体共角顶相连组成的络阴离子 $[\text{Si}_2\text{O}_6]^{4-}$ 沿 c 轴方向无限延伸成单链状硅氧骨干,链与链之间由 M_1 位置的 Al^{3+} 和 M_2 位置的 Na^+ 相连接。链内 $\text{Si}-\text{O}$ 键主要为共价键,链外阳离子(M_1 , M_2)与氧的化学键 $M_1/M_2-\text{O}$ 键主要为离子键。目前,硬玉矿物中含有结构水已成为一个普遍认同的观点,但迄今为止对缅甸硬玉岩中硬玉矿物的结构水存在形式、结合方式的研究极为薄弱,笔者通过显微红外光谱分析发现缅甸硬玉岩中硬玉矿物结构水的赋存状态和含量变化趋势,进而为探讨缅甸硬玉岩的成因机制提供一定的佐证。

1 辉石族矿物结构水的研究现状

前人(樊孝玉等,2007)采用 Nicolet 5700 型 Fourier 变换红外光谱仪对大别山超高压硬玉石英岩中硬玉的水进行了研究。结果显示,硬玉矿物普遍含有以 OH^- 形式存在的结构水,在红外光谱中出现 $3\,430 \sim 3\,460\text{ cm}^{-1}$ 、 $3\,545 \sim 3\,575\text{ cm}^{-1}$ 、 $3\,610 \sim 3\,640\text{ cm}^{-1}$ 3 组吸收峰,硬玉中结构水平均含量在 $1\,000 \times 10^{-6}$ 左右;另外,夏群科等(1999)测定了大量的名义上无水的天然矿物,认为几乎在所有的天然地幔矿物中都探测到 H 以 OH^- 的形式赋存,并对其进行了变温显微红外分析,其中单斜辉石、斜方辉石和金红石中的主要 OH^- 峰随着温度的升高而向低波数移动,说明温度的变化对结构水有一定的影响;王蓉等(2011)对华南地区广东英峰岭、广东徐闻张畴村、海南文昌福基田和福建林地的二辉橄榄岩包体进行了傅利叶变换红外光谱(FTIR)分析,结果显示包体中所有的辉石都含结构水,且所有的结构水以 OH^- 的形式存在,并通过对比不同地区的单斜辉

石、斜方辉石发现它们存在有大尺度上的横向不均一性,并得出辉石是华南上地幔重要的“水储库”,上地幔结构水含量具有大尺度横向不均一性。

缅甸硬玉岩矿区所处的大地构造位置在欧亚板块与印度板块相互碰撞的俯冲带上,俯冲带中的流体活动是变质作用、岩浆作用以及成矿作用的重要控制因素,这些微量的结构水可能构成了地幔中重要的储水库。另外,板块折返过程中的流体作用导致硬玉岩发生退变质作用,也是值得关注的重要现象,而退变质流体的来源及其流动方式和规模,一直是人们争论和研究的重点,近几年学者通过大量的研究对其成因又提出了一些不同的观点。有学者(崔文元等,2000)提出的新岩浆成因假说,认为形成翡翠的岩浆为相当于含水的硬玉质硅酸盐熔融体,可能来源于地幔,结晶压力低限为 $p > 1.5\text{ GPa}$,温度变化范围在 $650 \sim 800^\circ\text{C}$ 之间,这些有别于过去有人提出的花岗岩浆脱硅而形成翡翠的岩浆成因说。Shi 等(2008)运用 SHRIMP 技术在缅甸硬玉岩中鉴定出 3 组不同年龄的锆石,其中第 1 组锆石含有无 Na 富 Mg 的包裹体和具有典型的生长环带,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $163.2 \pm 3.3\text{ Ma}$,认为是与硬玉密切相关的超基性岩或蛇纹石化的形成时代;第 2 组锆石主要围绕第 1 组锆石生长,不具备明显的生长环带并含有硬玉化辉石包体,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $146.5 \pm 3.4\text{ Ma}$,该年龄为硬玉岩的变质年龄,即缅甸硬玉岩的形成年龄;第 3 组锆石切穿前面两组锆石生长,单点分析给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $122.2 \pm 4.8\text{ Ma}$,代表了硬玉岩形成后的一次热衰变。Qiu 等(2008)认为缅甸宝石级翡翠主体形成于晚侏罗纪时代,年龄为 $158 \pm 2\text{ Ma}$,而印度板块与亚洲板块的碰撞大约发生在 55 Ma 左右,这就从根本上限定出翡翠的形成与板块碰撞无关。另外,通过硬玉岩的脉状产状,以及硬玉岩中锆石轻稀土(LREE)亏损且重稀土(HREE)富集的特点推断翡翠是在流体存在情况下的热液交代产物,与大洋板块俯冲过程中的脱水流体有关。Harlow 等(2010)也认为硬玉岩寄主于叶蛇纹石为主的蛇纹岩中,并根据硬玉岩结构和阴极发光测试结果得出几乎所有的硬玉岩主要是在有效地俯冲和碰撞过程中,通过蛇纹石化橄榄岩和钠铝硅流体在高温高压环境中的相互作用而形成的。

同时,更多的研究人员认识到翡翠的形成是多阶段的(施光海等,2004),认为翡翠都经历了复杂的形成及演化过程,但主要可分为两阶段:即硬玉岩的

形成阶段(成岩)和改造阶段(包括成玉、角闪石化阶段)以及塑性变形,所以,除了硬玉岩的形成阶段外,很重要的是后期的成玉过程,普遍认为后期动力变质作用的改造起了重要作用,使得硬玉岩成玉,而使翡翠有别于一般的硬玉岩。综上,无论是哪种成因说,无不离开流体的参与,所以从微尺度观察缅甸翡翠中硬玉矿物结构水与结晶韵律环带、后成合晶的耦合关系,可以帮助我们在特定的历史背景下,为揭

示缅甸翡翠的成因与演化机制提供重要依据。

2 实验与测试方法

以缅甸产出的2块粗粒结构、淡紫色和1块细粒结构的硬玉岩为实验对象,将其切磨成0.03 cm(LJ-44-1)、0.02 cm(LJ-44-2)、和0.055 cm(SJ-6-1)的光片(图1),对光片进行偏光显微镜、宝石显微镜

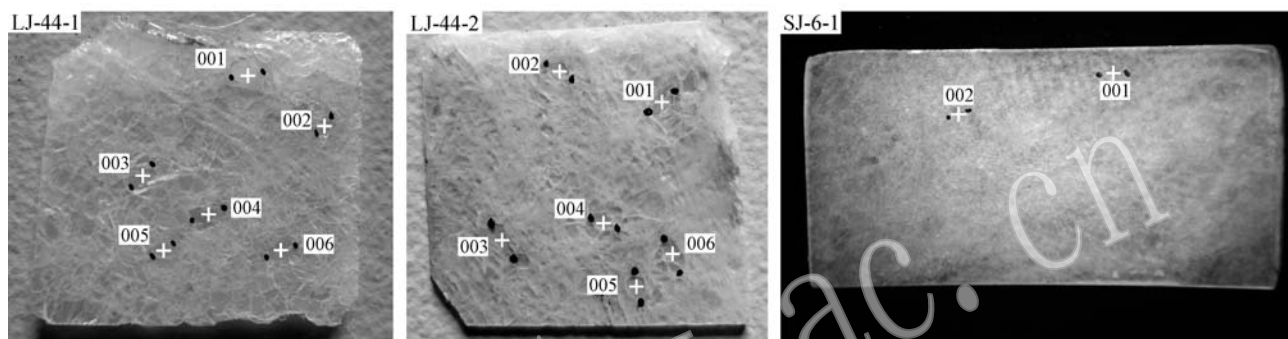


图1 实验样品(图中的数字为选取的硬玉单矿物颗粒)

Fig. 1 Experimental samples (the numbers in the figure are jadeite mineral grains)

观察和对比,用无水乙醇对光片进行清洗,并置于烘箱中在100℃以下干燥5 h以上,确保样品表面和裂隙中无自由水。在光片上分别选择单个颗粒保存完整且无破碎和重结晶的硬玉矿物进行显微红外光谱扫描。

硬玉结构水表征采用BRUKER LUMOS独立式红外显微镜,测试条件为非偏振光,透射法,波数范围4 000~2 500 cm^{-1} ,扫描次数32次,分辨率4 cm^{-1} ,其中LJ-44-1和LJ-44-2线扫描每个测试点大小为100 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$,SJ-6-1线扫描每个测试点大小为5 $\mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 。光谱收集和图谱处理均采用OPUS 7.2软件。每条曲线都进行适当的基线校正和拟合处理,根据Lambert-Beer定律 $c = \Delta/I\gamma d$ 计算硬玉颗粒结构水的含量,其中 c 为结构水含量($\times 10 - 6$), Δ 为积分吸收面积(cm^{-2}), I 为积分比吸收系数($7.09 \times 10^{-6} \cdot \text{cm}^2$), γ 为方向因子,对非均质的硬玉选取1/3, d 为光片厚度(cm)(樊孝玉等,2007)。硬玉成分测试采用JXA-8800R电子探针,测试条件为分辨率6 nm(30 kV)。

3 测试结果与分析

3.1 显微红外光谱表征

测试波数范围为4 000~2 500 cm^{-1} ,透射法测量发现,硬玉矿物中普遍含有结构水, OH^- 的吸收峰在不同结构的翡翠中有一定的差异,粗粒结构的硬玉岩中硬玉线扫描显示 OH^- 的吸收峰大致为3 617 cm^{-1} 和3 552 cm^{-1} ,而面扫描显示 OH^- 的吸收峰大致为3 621 cm^{-1} 、3 539 cm^{-1} 、3 467 cm^{-1} 、3 394 cm^{-1} 和3 326 cm^{-1} ,细粒结构的硬玉岩中硬玉线扫描 OH^- 的吸收峰大致为3 541 cm^{-1} (图2和表1)。反射法测量相同硬玉颗粒的红外吸收光谱,测试波数范围为2 000~700 cm^{-1} ,根据资料显示(刘琰等,2006),硬玉的吸收峰主要表现为900~1 200 cm^{-1} 范围内的3个频带:1 162 cm^{-1} 、1 079 cm^{-1} 和950 cm^{-1} ,其中1 079 cm^{-1} 频带最强。测试结果显示与硬玉矿物的标准图谱均较吻合(图3和表1),表明所选颗粒均为较纯净硬玉。

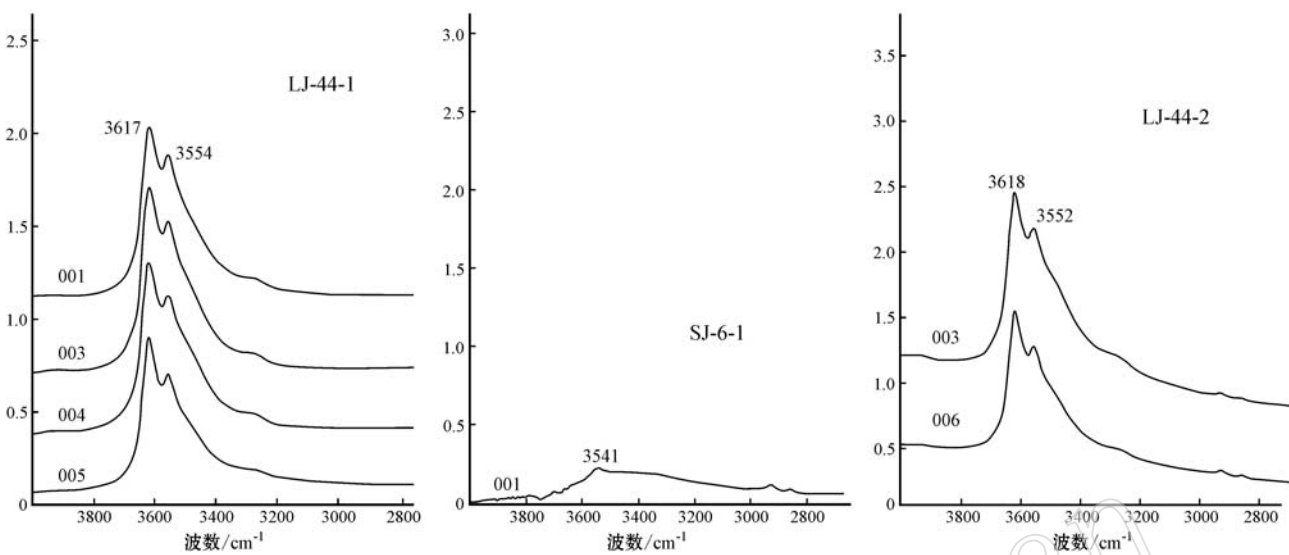


图 2 缅甸硬玉岩中硬玉矿物显微红外光谱表征(4 000~2 000 cm⁻¹,透射法)

Fig. 2 Characterization of micro-infrared spectroscopy of jadeite from Myanmar (4 000~2 000 cm⁻¹, transmission method)

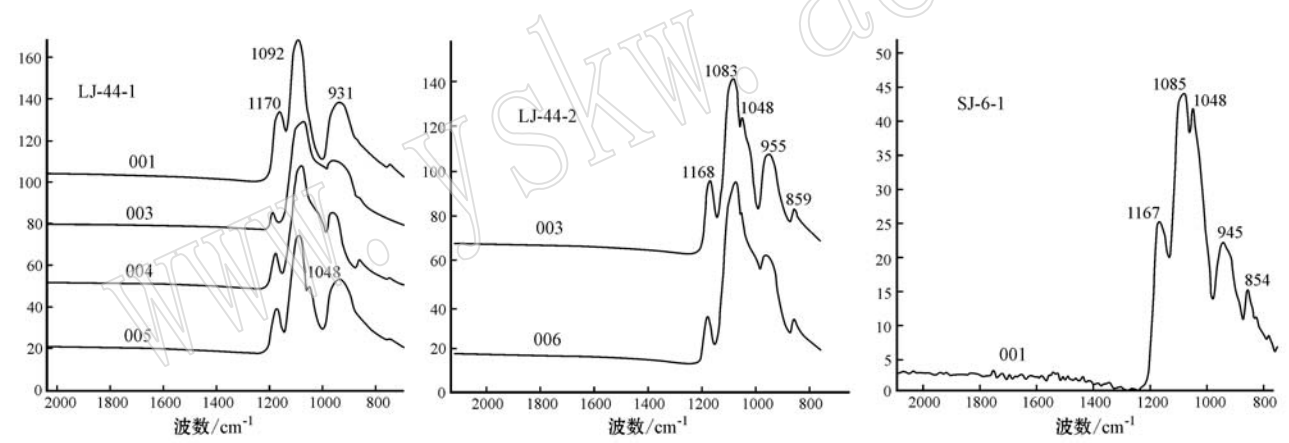


图 3 缅甸硬玉岩中硬玉矿物显微红外光谱表征(1 700~700 cm⁻¹,反射法)

Fig. 3 Characterization of micro-infrared spectroscopy of jadeite from Myanmar (1 700~700 cm⁻¹, reflection method)

表 1 缅甸硬玉岩中硬玉矿物红外反射光谱谱峰解析 cm⁻¹
Table 1 Analyses of micro-infrared reflection spectroscopy
of jadeite from Myanmar

样品号	颗粒号	M—OH 伸缩 振动	O—Si—O 和 Si—O—Si 的 反对称伸缩振动及 O—Si— O 对称伸缩振动
LJ-44-1	001	3 617, 3 554	1 164, 1 090, 950
	003	3 617, 3 552	1 186, 1 072, 965
	004	3 621, 3 552	1 175, 1 079, 965
	005	3 621, 3 555	1 175, 1 091, 1 049, 957
LJ-44-2	003	3 610, 3 552	1 171, 1 083, 1 048, 956
	006	3 617, 3 555	1 171, 1 130, 1 079, 1 049, 953
SJ-6-1	001	3 541	1 165, 1 080, 1 047, 941

结合 OPUS7.2 软件和 Lambert-Beer 定律计算缅甸硬玉岩中硬玉矿物结构水的含量,并对比线扫描光谱得到同一颗粒不同部位的结构水含量,结果显示:① 每个硬玉颗粒中均发现不等量的结构水;② 同一硬玉矿物内部结构水含量存在明显的不均一性。样品 LJ-44-1 颗粒 001 最高含水量可达 $5\,079.24\times10^{-6}$,最低仅为 77.12×10^{-6} (图 4、表 2);样品 LJ-44-2 颗粒 003 最高含水量可达 $1\,392.93\times10^{-6}$,最低仅为 107.34×10^{-6} (图 5、表 3);样品 SJ-6-1 颗粒 001 中最高含水量为 286.28×10^{-6} ,最低含水量为 207.01×10^{-6} (图 6、表 4)。

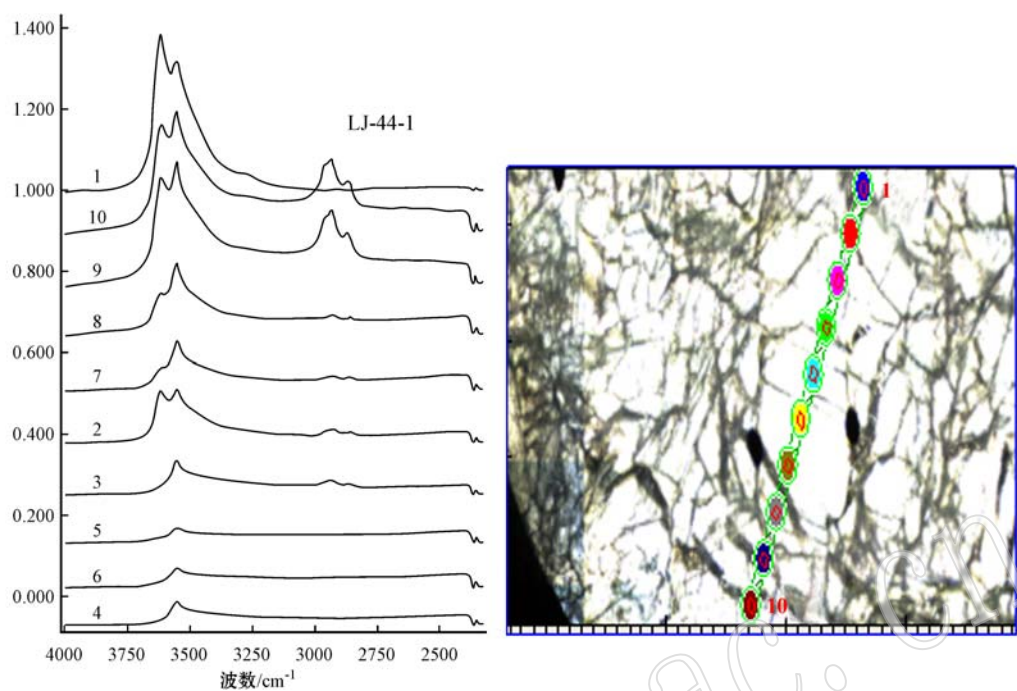


图 4 缅甸硬玉岩中硬玉矿物线扫描显微红外透射光谱表征(LJ-44-1,颗粒 001)
Fig. 4 Characterization of line scanning micro-infrared transmission spectroscopy of jadeite from Myanmar (LJ-44-1, particles 001)

表 2 缅甸硬玉岩中硬玉结构水含量计算(LJ-44-1,颗粒 001)
Table 2 Calculations of constitutional water content of jadeite from Myanmar (LJ-44-1, particles 001)

样品号	颗粒号	样厚 <i>d</i> /cm	点位	吸收峰位/ cm ⁻¹	相对强度 <i>A</i> /%	宽度/ cm ⁻¹	积分面积 Δ/ cm ⁻²	水含量 <i>C</i> / 10 ⁻⁶	总含水量/ 10 ⁻⁶	残差
LJ-44-1	001	0.02	1	3 617	0.86	48.51	65.69	1 391.74	5 079.24	0.020
				3 552	0.61	82.09	78.98	1 673.31		
				3 469	0.33	183.21	95.07	2 014.19		
			2	3 617	0.10	42.69	6.44	136.44	597.03	0.003
				3 553	0.09	72.43	10.74	227.54		
				3 470	0.05	134.93	11.00	233.05		
			3	3 551	0.05	46.79	3.67	77.75	596.18	0.006
				3 448	0.04	350.01	24.47	518.43		
			4	3 553	0.04	53.98	3.51	74.36	172.88	0.001
				3 480	0.02	129.62	4.65	98.52		
			5	3 543	0.03	92.00	3.64	77.12	77.12	0.002
			6	3 552	0.03	70.72	3.49	73.94	182.84	0.000 9
				3 473	0.02	156.12	5.14	108.90		
			7	3 620	0.02	32.38	1.12	23.73	617.79	0.004
				3 550	0.09	69.76	9.57	202.75		
				3 433	0.05	248.63	19.59	415.04		
			8	3 621	0.05	40.44	3.23	78.4	883.26	0.005
				3 551	0.12	69.16	12.88	272.88		
				3 448	0.07	259.26	28.81	610.38		
			9	3 629	0.10	34.66	5.17	109.53	1 376.90	0.004
				3 609	0.13	44.88	9.24	195.76		
				3 553	0.20	69.42	21.90	463.98		
				3 477	0.12	148.75	28.68	607.63		
			10	3 617	0.19	46.96	13.84	293.22	1 380.30	0.006
				3 553	0.20	72.68	23.12	489.83		
				3 469	0.11	156.13	28.19	597.25		

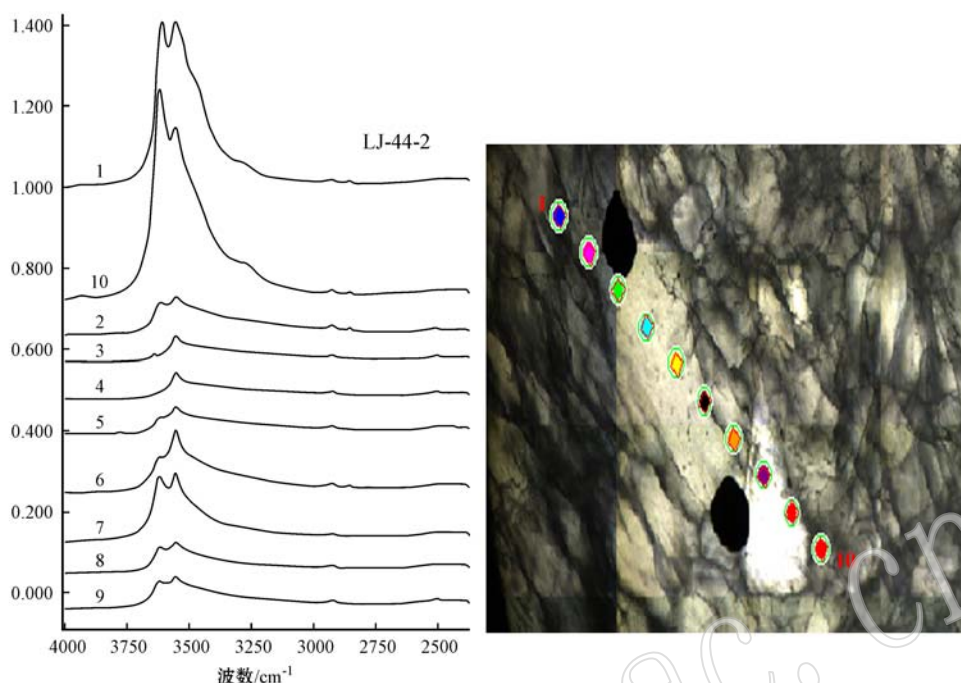


图5 缅甸硬玉岩中硬玉矿物线扫描红外透射光谱表征(LJ-44-2, 颗粒003)

Fig. 5 Characterization of line scanning micro-infrared transmission spectroscopy of jadeite from Myanmar (LJ-44-2, particles 003)

另外,对比线扫描得到的同一硬玉颗粒不同部位的结构水含量(图7),发现硬玉矿物颗粒的结构水存在明显的不均一性,结构较为疏松的硬玉岩中硬玉结构水含量出现明显的中间少外侧多的现象,而结构较为致密的硬玉岩中硬玉结构水含量普遍偏低且变化趋势不明显,同一颗粒中结构水含量较为均一。样品 LJ-44-1 颗粒 001 点位 1 和 10 号结构水含量分别为 $5\,079.24 \times 10^{-6}$ 和 $1\,380.3 \times 10^{-6}$, 5 号点位结构水含量为 77.12×10^{-6} ; 样品 LJ-44-2 颗粒 003 点位 1 和 10 号结构水含量分别为 $1\,392.93 \times 10^{-6}$ 和 $1\,485.17 \times 10^{-6}$, 5 号点位结构水含量为 160.03×10^{-6} ; 样品 SJ-6-1 颗粒 001 点位 1 和 8 号结构水含量分别为 207.01×10^{-6} 和 232.36×10^{-6} , 4 和 5 号点位结构水含量分别为 242.84×10^{-6} 和 221.34×10^{-6} 。

3.2 化学成分分析

EPMA 分析结果表明所选取的硬玉颗粒化学成分较为纯净,样品主要元素为 Na、Al、Si 和 O,元素质量百分比(表5)平均值约为 10.94%、15.52%、31.61%和 33.46%,元素数量百分比(表6)平均值约为 9.65%、11.67%、22.76%和 42.5%,原子数比值基本满足 1:1:2:5,与前人的研究结果进行比对(刘琰等,2006),可见测试颗粒均为较为纯净的硬玉矿物,且成分差异并不明显,结构水含量的变化与其

成分并无太大关联。

4 讨论

大量研究显示,缅甸硬玉岩的形成主要分为成岩和成玉两个阶段。成岩阶段为原生硬玉岩,是硬玉质熔体/热液在相对静态环境下直接结晶形成的,成玉阶段硬玉岩由于变形变质作用表现为变形变质结构,结果导致硬玉岩的结构改变和某些致色元素的迁移集聚,这对硬玉岩的形成至关重要(施光海等,2004)。在结构水含量测量的结果中发现,结构疏松的硬玉岩中硬玉颗粒的含水量明显较结构致密的硬玉岩中硬玉颗粒的含水量多,这一现象可用缅甸硬玉岩的形成过程做较为合理的解释。缅甸硬玉岩原生矿床一般位于板块俯冲碰撞带上,而硬玉岩的整体形成过程与大陆板块向大洋板块的俯冲折返相关。在板块俯冲过程中蚀变的洋壳玄武岩及其上覆沉积物随着俯冲带温度和压力的升高,能够释放出大量的富水流体,由于俯冲速率较快,少量的含水流体进入了名义上无水矿物(如硬玉)中,这一阶段即为翡翠的成岩阶段,俯冲过程导致结构疏松的硬玉岩中硬玉矿物含有较为大量的结构水;随即,大陆板块发生折返,由于压力突然降低,含水(H_2O 和

表 3 缅甸硬玉岩中硬玉矿物结构水含量计算(LJ-44-2, 颗粒 003)

Table 3 Calculations of constitutional water content of jadeite from Myanmar (LJ-44-2, particles 003)

样品号	颗粒号	样厚 d/cm	点位	吸收峰位/ cm ⁻¹	相对强度 A /%	宽度/ cm ⁻¹	积分面积 Δ/ cm ⁻²	水含量 C/ 10 ⁻⁶	总含水量/ 10 ⁻⁶	残差
LJ-44-2	003	0.03	1	3 621	0.17	30.87	8.21	115.96	1 392.93	0.008
				3 603	0.21	37.34	12.17	171.89		
				3 560	0.20	52.09	16.02	226.27		
				3 529	0.15	62.83	14.68	207.34		
				3 470	0.20	153.57	47.54	671.47		
			2	3 633	0.02	23.01	0.73	10.31	443.78	0.004
				3 611	0.04	35.69	2.13	30.08		
				3 546	0.07	103.14	10.80	152.54		
				3 411	0.05	238.87	17.76	250.85		
			3	3 640	0.01	19.96	0.28	3.95	107.34	0.000
				3 553	0.05	67.20	5.52	77.97		
				3 469	0.02	66.89	1.80	25.42		
			4	3 548	0.04	62.00	4.32	61.02	274.01	0.004
				3 415	0.03	297.00	15.08	212.99		
			5	3 616	0.03	31.79	1.00	14.12	160.03	0.002
				3 552	0.05	66.63	5.05	71.33		
				3 474	0.03	119.83	5.28	74.58		
			6	3 620	0.06	60.45	5.36	75.71	375.56	0.002
				3 553	0.11	56.27	9.29	131.21		
				3 484	0.06	132.74	11.94	168.64		
			7	3 627	0.08	50.58	6.58	92.94	484.18	0.002
				3 607	0.05	51.48	4.42	62.43		
				3 553	0.10	57.2	9.35	132.06		
				3 490	0.06	140.48	13.93	196.75		
			8	3 625	0.03	38.85	1.95	27.54	214.69	0.001
				3 603	0.02	42.43	1.50	21.19		
				3 552	0.05	67.39	5.38	75.99		
				3 478	0.03	126.11	6.37	89.97		
			9	3 634	0.02	41.05	1.35	19.07	244.49	0.003
				3 611	0.03	48.31	2.40	33.90		
				3 553	0.05	76.03	6.04	85.31		
				3 475	0.03	140.00	7.52	106.21		
			10	3 618	0.41	53.56	34.83	491.95	1 485.17	0.010
				3 553	0.29	83.11	37.64	531.64		
				3 477	0.18	118.81	32.68	461.58		

OH⁻)的各种矿物会发生分解或羟基出熔。因此,羟基能够成为退变质作用中一个重要的流体催化剂,加上来自先前存在的流体包裹体和含羟基矿物的流体,一起构成了退变质流体的重要来源(郑永飞, 2004)。不同结构硬玉岩中硬玉矿物结构水含量的表征,在一定程度上验证了硬玉岩的阶段形成说,且硬玉岩的阶段形成说也为其中硬玉矿物含有结构水这一现象提供了佐证。

另外,研究表明硬玉岩中硬玉矿物结构水含量

存在规律的不均一性,笔者推断这与板块的折返过程中 H⁺的分解或出熔具有一定的关系。板块折返过程中即硬玉岩的成玉阶段,压力的突然降低导致 H⁺在矿物颗粒中由内向外出熔,致使在结构疏松的硬玉岩中结构水含量呈现中心少外侧多;而压力稳定后 H⁺的出熔结束,并表现为结构致密的硬玉岩中硬玉颗粒结构水含量较为均匀,这也说明结构水在样品中已经达到平衡状态,并未受到后期流体活动的改造。

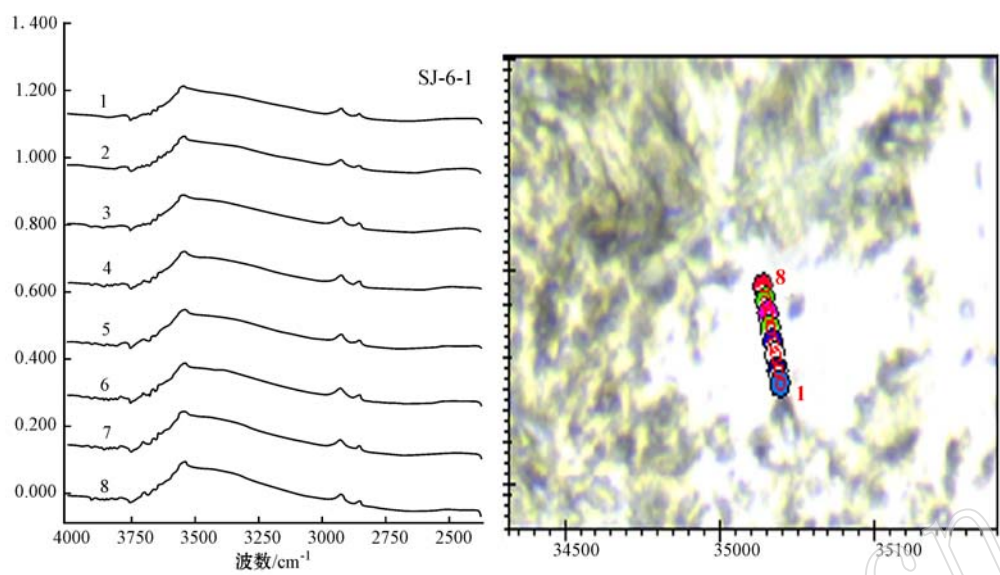


图 6 缅甸硬玉岩中硬玉矿物线扫描红外透射光谱表征(SJ-6-1,颗粒 001)

Fig. 6 Characterization of line scanning micro-infrared transmission spectroscopy of jadeite from Myanmar (SJ-6-1, particles 001)

表 4 缅甸硬玉岩中硬玉矿物结构水含量计算(SJ-6-1,颗粒 001)

Table 4 Calculations of constitutional water content of jadeite from Myanmar (SJ-6-1, particles 001)

样品号	颗粒号	样厚 d/cm	点位	吸收峰位/ cm ⁻¹	相对强度 A /%	宽度/ cm ⁻¹	积分面积 Δ/ cm ⁻²	水含量 C/ 10 ⁻⁶	总含水量/ 10 ⁻⁶	残差
SJ-6-1	001	0.055	1	3 547	0.07	127.31	13.95	107.47	207.01	0.004
				3 442	0.04	192.75	12.92	99.54		
			2	3 547	0.07	132.35	15.31	117.95	224.11	0.040
				3 438	0.05	191.04	13.78	106.16		
			3	3 547	0.08	135.83	16.31	125.65	237.98	0.004
				3 435	0.05	189.70	14.58	112.33		
			4	3 546	0.08	142.34	17.86	137.60	242.84	0.004
				3 433	0.05	183.68	13.66	105.24		
			5	3 546	0.08	143.84	19.04	146.69	221.34	0.004
				3 437	0.04	153.81	9.69	74.65		
			6	3 546	0.09	149.69	20.51	158.01	274.27	0.004
				3 430	0.05	182.17	15.09	116.26		
			7	3 546	0.09	152.89	21.92	168.87	286.28	0.004
				3 429	0.05	177.65	15.24	117.41		
			8	3 543	0.11	163.42	27.17	209.32	232.36	0.005
				3 453	0.02	83.71	2.99	23.04		

5 结论

(1) 缅甸硬玉岩中硬玉普遍含有结构水, 结构水在红外光谱中主要表征为 3 610~3 620 cm⁻¹ 和 3 540~3 550 cm⁻¹ 两个区域的谱峰;

(2) 不同结构的硬玉岩中硬玉矿物结构水含量有较为明显的差异性, 且结构水含量的变化具有一

定的规律性: 结构疏松的硬玉岩中硬玉矿物结构水含量外侧多中间少, 结构致密的硬玉岩中硬玉矿物结构水含量各部位较为均一;

(3) 缅甸硬玉岩中结构水的含量差异和变化趋势与其化学成分并无关联, 其结构水表征可能是在成岩成玉阶段及板块俯冲和折返过程中的流体参与作用的结果。

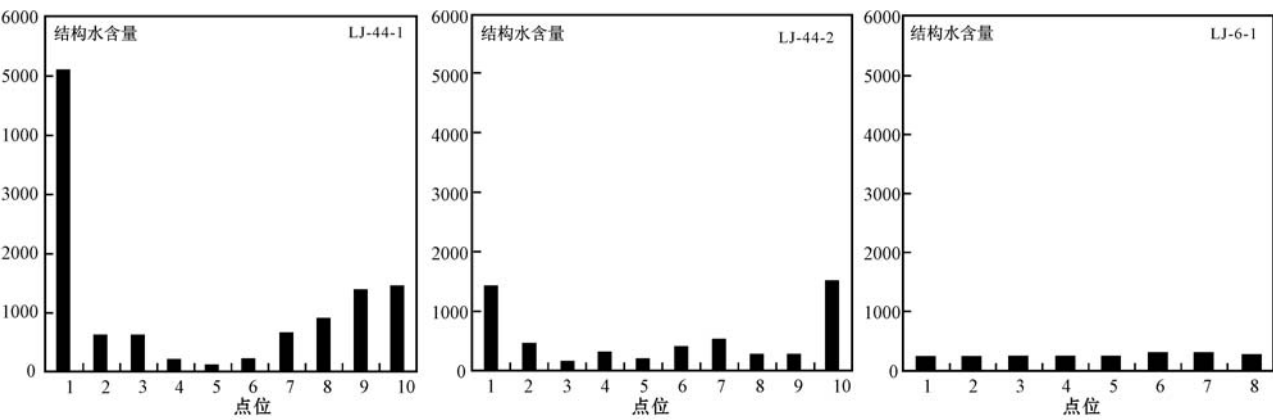


图 7 缅甸硬玉岩中同一硬玉颗粒结构水含量柱状图表征

Fig. 7 Histograms of constitutional water content of the same jadeite grain from Myanmar

表 5 样品中硬玉矿物化学成分分析 $w_B/\%$

Table 5 Chemical composition analyses of jadeite minerals in the sample										
样品号	颗粒号	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	O	C	Total
LJ-44-1	001	10.86	0.15	15.43	31.15	0.08	0.27	33.75	8.30	99.99
LJ-44-2	003	11.54	0.00	16.12	32.74	0.00	0.00	34.16	5.44	100
SJ-6-1	001	10.41	0.32	15.00	30.94	0.66	0.52	32.47	9.68	100

表 6 样品中硬玉矿物化学成分分析 $x_B/\%$

Table 6 Chemical composition analyses of jadeite minerals in the sample										
样品号	颗粒号	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	O	C	Total
LJ-44-1	001	9.51	0.12	11.51	22.31	0.04	0.14	42.45	13.91	99.99
LJ-44-2	003	10.37	0.15	12.36	23.89	0.00	0.14	44.37	8.72	100.00
SJ-6-1	001	9.08	0.27	11.14	22.08	0.34	0.26	40.68	16.15	100.00

References

Cui Wenyan, Shi Guanghai, Yang Fuxu, *et al.* 2000. A new view-point—Magma genesis of jadeite jade[J]. Journal of Gems and Gem-mology, 2(3): 16~21(in Chinese with English abstract).

Fan Xiaoyu, Wu Xiuling, Meng Dawei, *et al.* 2007. Water in UHP jadeite quartzites of dabi mountains:evidence from Micro-FTIR[J]. Earth Science Journal of China University of Geosciences, 32(2): 167~174(in Chinese with English abstract).

Harlow G E and Sorensen S S. 2010. Jade (nephrite and jadeite) and serpentinite: Metasomatic connections[J]. International Geology Re-view, 47: 113~146.

Liu Yan, Deng Jun and Wang Lihua. 2006. The application of several types of large-scale exactitude equipments in the identification of jadeite[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 26(3): 577~582 (in Chinese with English abstract).

Qiu Zhili, Wu Fuyuan, Yang Shufeng, *et al.* 2008. Age and genesis of zircon U-Pb ages and Hf isotopic constraints to form the Burma jade [J]. Chinese Science Bulletin, 53(24): 3 104~3 111.

Shi Guanghai and Cui Wenyan. 2004. Textures and microstructures of Myanmar jadeite: implications for formation of jadeitic Fei-ts' ui [J]. Journal of Gems and Gemmology, 6(3): 8~11(in Chinese with English abstract).

Shi Guanghai, Cui Wengyuan, Cao Shumin, *et al.* 2008. Ion micro-probe zircon U-Pb age and geochemistry of the Myanmar jadeite [J]. Journal of the Geological Society, 165: 221~234.

Wang Rong and Zhang Baoming. 2011. The water area of Southern Chi-na olive in Cenozoic basaltic xenoliths[J]. Scientia Sinica, 41(6):

832~844(in Chinese with English abstract).

Xia Qunke, Chen Daogong and Zhi Xiachen. 2011. Research progress in structural water in nominally anhydrous mantle minerals[J]. Advance in Earth Sciences, 14(5): 452~457(in Chinese with English abstract).

Zheng Yongfei. 2004. Fluid activity of deep continental subduction exhumation process[J]. Chinese Science Bulletin, 49(10): 917~929 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

崔文元, 施光海, 杨富绪, 等. 2000. 一种新观点——翡翠新的岩浆成因说[J]. 宝石和宝石学杂志, 2(3): 16~21.

樊孝玉, 吴秀玲, 孟大维, 等. 2007. 大别山超高压硬玉石英岩中的水: 来自红外光谱的证据[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 32(2): 167~174.

刘琰, 邓军, 王丽华. 2006. 大型光谱仪器在翡翠检测中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 26(3): 577~582.

施光海, 崔文元. 2004. 缅甸硬玉岩的结构与显微构造: 硬玉质翡翠的成因意义[J]. 宝石和宝石学杂志, 6(3): 8~11.

王蓉, 张保民. 2011. 华南地区新生代玄武岩中橄榄岩包体的含水性[J]. 中国科学: 地球科学, 41(6): 832~844.

夏群科, 陈道公, 支霞臣. 1999. 名义上无水的地幔矿物中结构水的研究进展[J]. 地球科学进展, 14(5): 452~457.

郑永飞. 2004. 深俯冲大陆板块折返过程中的流体活动[J]. 科学通报, 49(10): 917~929.

致 谢

2014年度,许多地质学及相关学科的专家在百忙之中抽出时间,接受编辑部邀请为本刊评审了稿件,为提高刊物质量做出了贡献。没有这些专家的辛勤劳动,本刊是不可能在多方面取得进步的。为此,编辑部特代表主编及主办单位,向他们表示衷心的感谢! 这些专家有(以汉语拼音为序):

白 峰	柏道远	蔡元峰	柴凤梅	陈 雷	崔浩杰	党 志	董发勤	丰成友	高 俊	葛文春
郭 锋	郭 颖	郭召杰	何金先	何雪梅	胡大千	黄小龙	黄智龙	吉芳英	江思宏	姜常义
姜耀辉	蒋少涌	赖绍聪	李光明	李国武	李金祥	李永军	廖群安	林广春	刘 冬	刘钦甫
刘 燊	刘 琰	刘玉平	柳小明	鲁安怀	吕志成	马昌前	苗来成	潘小菲	裴先治	彭润民
戚学祥	钱壮志	乔秀夫	秦克章	邱检生	曲晓明	邵龙义	宋玉财	苏本勋	孙庆峰	唐功建
唐菊兴	陶 平	童 英	王保弟	王长秋	王立本	王 瑞	王义天	王 瑜	吴平霄	吴元保
夏林圻	夏学惠	项新葵	肖 龙	肖庆辉	谢桂青	谢玉玲	徐九华	徐学义	薛传东	杨富全
杨瑞东	杨志明	杨竹森	叶 霖	英基丰	于炳松	张彩华	张传林	张德会	张建新	张连昌
张良钜	张 旗	张拴宏	张玉君	赵太平	赵振华	郑建平	郑远川	周汉文	朱永峰	